



# Об использовании пакета инженерного анализа Фидесис в условиях Индустрии 4.0. Примеры решенных промышленных задач с использованием массивно-параллельных технологий

## **Левин Владимир Анатольевич**

Заслуженный профессор Московского университета, Заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры «Вычислительная механика» механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, научно-технический руководитель компании Фидесис

## **Вершинин Анатолий Викторович**

Профессор кафедры «Вычислительная механика» механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, технический директор компании Фидесис



# «Цифровое средство производства»

В условиях новой промышленной революции (Индустрия 4.0), одной из основ которой стала цифровизация, во всех отраслях промышленности, с которыми связана наука механика, стали происходить стремительные изменения в востребованности и способах использования научных результатов.

*Изменяется инструментарий, используемый при получении научных результатов.*

Возникло понятие **«цифровое средство производства» (ЦСП)** – программный продукт, с помощью которого создается (проектируется) изделие.

*В частности, это промышленные пакеты для моделирования при проведении инженерного анализа изделия (**CAE – Computer-aided engineering**) на стадии проектирования и эксплуатации.*

Практически общепринятыми стали сквозное проектирование изделия и унификация методик проектирования, создание «цифровых двойников», оцифровка имеющихся технических архивов и вовлечение их в моделирование.



## Решение задач МДТТ и теории прочности

До 1995 г. – до внедрения CAE в расчетную практику	После 1995 г. – после внедрения CAE в расчетную практику
Механическая постановка задачи	Механическая постановка задачи (CAD-модель, материал, внешние воздействия)
Математическая постановка задачи (в общем случае - система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с граничными и начальными условиями)	Математическая постановка задачи заложена внутри пакета и автоматически адаптируется под конкретную задачу
Решение системы дифференциальных уравнений (обычно одним из методов для получения приближенного решения с тем или иным обоснованием единственности и сходимости)	Расчет в пакете (обычно МКЭ), оценка инженерной сходимости средствами пакета
Оценка НДС, на ее основе в соответствии с выбором критерия выделение «опасных областей»	Получение (в любом виде; обычно графическом, включая 3D) полей параметров НДС и практически автоматический вывод об «опасных областях» в соответствии с выбранными критериями прочности

# Теория многократного наложения больших деформаций

(Теория для решения задач о перераспределении в теле больших деформаций, то есть задач, в которых в процессе нагружения изменяются (неоднократно) границы и (или) граничные условия)

Задачи (включая связанные) о последовательном дискретном или непрерывном образовании в нагруженном теле концентраторов напряжений (полости, включение) и их взаимодействии и взаимовлиянии.





# О компании



Ассоциация Разработчиков Программных Продуктов

Отечественный  
софт

Компания «Фидесис» - российский разработчик универсального программного комплекса нового поколения для высокоточных прочностных инженерных расчетов (CAE, computer-aided engineering).

Компания Фидесис основана в 2009 году сотрудниками и выпускниками кафедры вычислительной механики МГУ имени М.В. Ломоносова. Компания имеет статус резидента технологической долины МГУ имени М.В. Ломоносова.



Тестирование CAE Fidesys выполнено в строгом соответствии со стандартами NAFEMS. Компания является членом российской Ассоциации разработчиков программных продуктов (АРПП). CAE Fidesys входит в реестр инновационной продукции ПАО Газпром и реестр отечественного ПО



Запись в реестре от 23.12.2016 №2570



# Аттестация и сертификация

СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

**СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ**

№ РОСС RU.НВ56.Н03400  
Срок действия с 26.12.2019 по 25.12.2024  
№ 0637010

Орган по сертификации RARU.11НВ56  
Орган по сертификации продукции ООО "Орион". Адрес: 600033, РОССИЯ, Владимирская обл, г Владимир, ул Суздальская, дом 37, помещение № 4. Телефон +7 4922494301, адрес электронной почты info@oriion-cert.ru

ПРОДУКЦИЯ Программный комплекс CAE Fidesys (Фидесис) версия 4.0 (комплекты поставки Standard и Professional) и модули в составе: CAE Fidesys HPC (Фидесис), CAE Fidesys Dynamics (Фидесис), CAE Fidesys Composites (Фидесис). Согласно приложению бланка № 0102248-0102250. Серийный выпуск.

СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ  
СП 33.13330.2012, СНиП 2.04.12-86, СП 36.13330.2012, СНиП 2.05.06-85\*, ГОСТ Р 55989-2014, ГОСТ Р 55990-2014, СП 284.1325806.2016, СП 34-116-97, СТО Газпром 2-2.1-249-2008, СТО Газпром 2-2.1-318-2009, РД-23.640.00-КТН-084-18, ГОСТ 28195-89, ГОСТ 28866-90, ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-95, ГОСТ Р ИСО/МЭК 12119-2000, ГОСТ Р ИСО 9127-04

ИЗГОТОВИТЕЛЬ Общество с ограниченной ответственностью «ФИДЕСИС». ОГРН: 1107746291443, ИНН: 7725692471, КПП: 772501001. Адрес: РОССИЯ, 115114, г. Москва, ул. Летниковская, д.5, телефон: 7 (495) 725-81-10 / 7 (495) 177-36-18, адрес электронной почты: contact@cae-fidesys.com.

СЕРТИФИКАТ ВЫДАН Общество с ограниченной ответственностью «ФИДЕСИС». ОГРН: 1107746291443, ИНН: 7725692471, КПП: 772501001. Адрес: РОССИЯ, 115114, г. Москва, ул. Летниковская, д.5, телефон: 7 (495) 725-81-10 / 7 (495) 177-36-18, адрес электронной почты: contact@cae-fidesys.com.

НА ОСНОВАНИИ Протокол испытаний № 001/А-17/11.21 от 26.12.2019 года, выданный Испытательной лабораторией Общества с ограниченной ответственностью "ТАНТАЛ" (аттестат аккредитации РОСС RU.31578.040/ЛЮ.ИЛ13)

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ  
Схема сертификации: 3с

Руководитель органа: *Е.Г. Зонин*  
Эксперт: *Р.С. Анкина*

Е.Г. Зонин  
инженер, специалист

Р.С. Анкина  
инженер, специалист

Сертификат не применяется при обязательной сертификации

**АТТЕСТАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

«CAE Fidesys Professional 3.1»

Федеральное бюджетное учреждение  
«Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»  
(ФБУ «НТЦ ЯРБ»)  
Экспертный совет по аттестации программ для ЭВМ при Ростехнадзоре

регистрационный № выдан 573 от 05 декабря 2022 г.  
Акционерному обществу «Красная Звезда»  
(АО «Красная Звезда»).

Адрес: Россия, 115230, Москва, Электротитный проезд, д. 1А.

срок действия до 05 декабря 2032 г.

Заместитель директора ФБУ «НТЦ ЯРБ»,  
Председатель Экспертного совета  
по аттестации программ для ЭВМ  
при Ростехнадзоре, канд. техн. наук

С.Н. Богдан

**ETSON** | EUROPEAN TECHNICAL SAFETY ORGANIZATION NETWORK

## Тип анализа

Статический расчет в лин. и нелин. постановке

Анализ устойчивости

Гармонический анализ

Модальный анализ

Динамический анализ в лин. и нелин. постановке

Линейно-спектральный анализ (сейсмика)

**Аттестация проводилась на двух секциях**

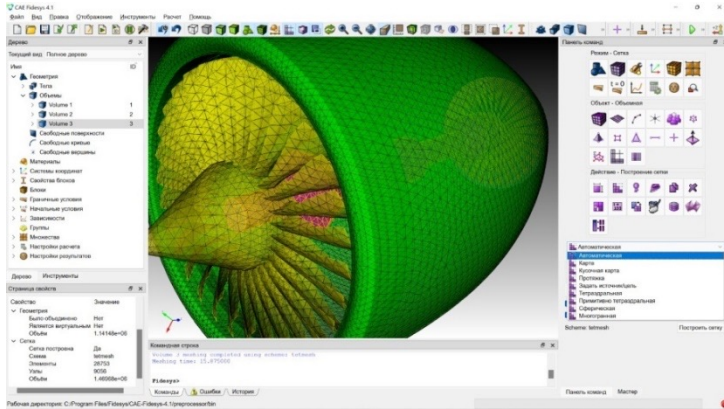
Секция №4 – Прочность

Секция №6 – Строительная

**Область применения по аттестационному паспорту:** Не зависит от типа ОИАЭ.



# ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС CAE FIDESYS



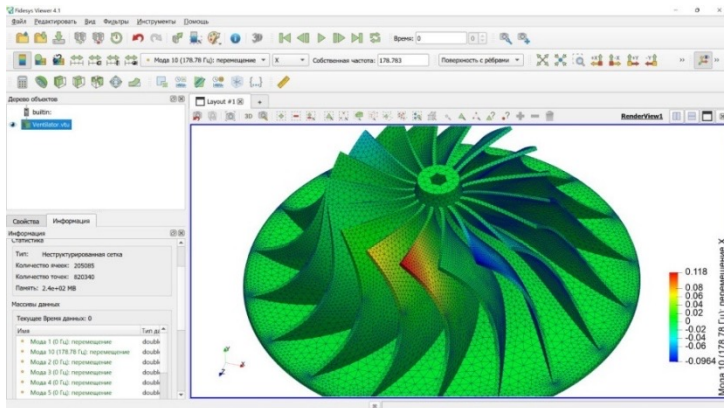
Интерфейс препроцессора CAE Fidesys

Разработка пакета по стандартам NAFEMS



обеспечивает надежное тестирование и точность расчетов

Партнерство с ведущими производителями операционных систем, процессоров и серверного оборудования позволило обеспечить надежную работу пакета CAE Fidesys



Интерфейс постпроцессора CAE Fidesys

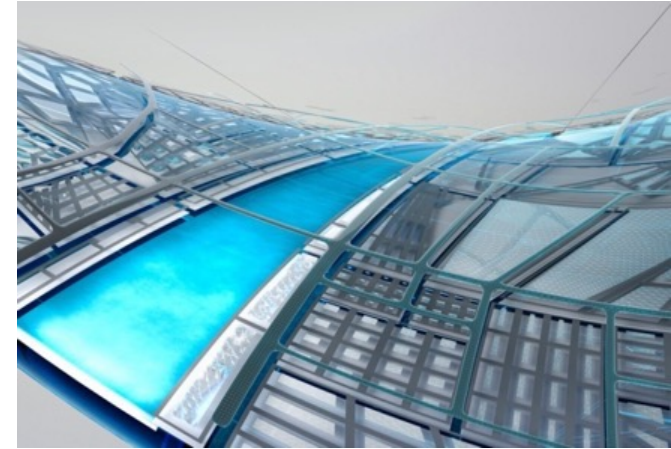
Интеграция с CAD системами и другими CAE решениями делает пакет Fidesys удобным элементом IT инфраструктуры





# ПОДДЕРЖКА CAD/CAE-ФОРМАТОВ

Fidesys поддерживает импорт наиболее востребованных CAD-форматов, а также импорт сеток и моделей из других программных комплексов




- ACIS (\*.sat, \*.sab);
- IGES (\*.igs, \*.iges);
- STEP (\*.stp, \*.step);
- AVS (\*.avs);
- Genesis/Exodus (\*.g, \*.gen, \*.e, \*.exo);
- Facets (\*.fac);
- GAMBIT Real Geometry (\*.dbs);
- Parasolid (\*.x\_t, \*.x\_b);
- CATIA (\*.CATPart, \*.CATProduct);
- SolidWorks (\*.sldprt, \*.sldasm);
- Pro/E (\*.prt, \*.asm);
- STL Files (\*.stl);
- AzoreCFD (\*.azmsh);
- Stanford Polygon (\*.ply);
- Wavefront Object (\*.obj);
- Patran (\*.pat, \*.neu, \*.out);
- Ideas (\*.unv);
- JT (\*.jt);
- Additive (\*.cli);
- Abaqus (\*.inp);
- Fluent (\*.msh);
- Nastran (\*.bdf);
- Siemens NX (\*.prt);
- LS-Dyna (\*.k\*);
- Ansys (\*.cdb).

ИМПОРТ МОДЕЛЕЙ В FIDESYS

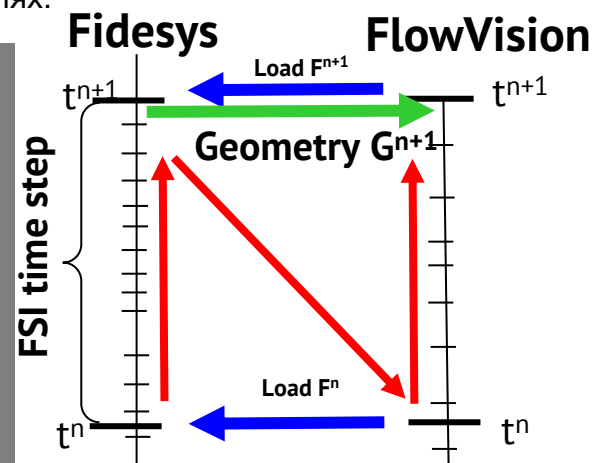
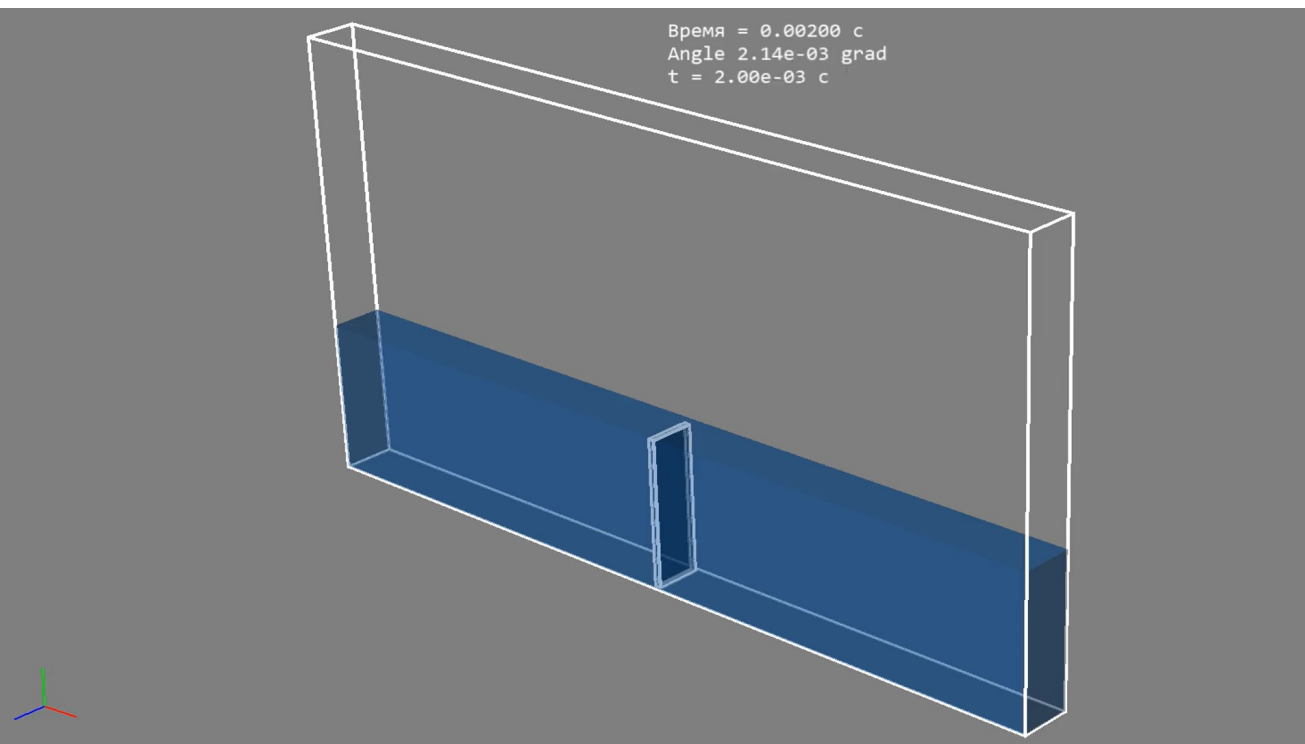




# Возможности CAE Fidesys

## Интеграция с FlowVision

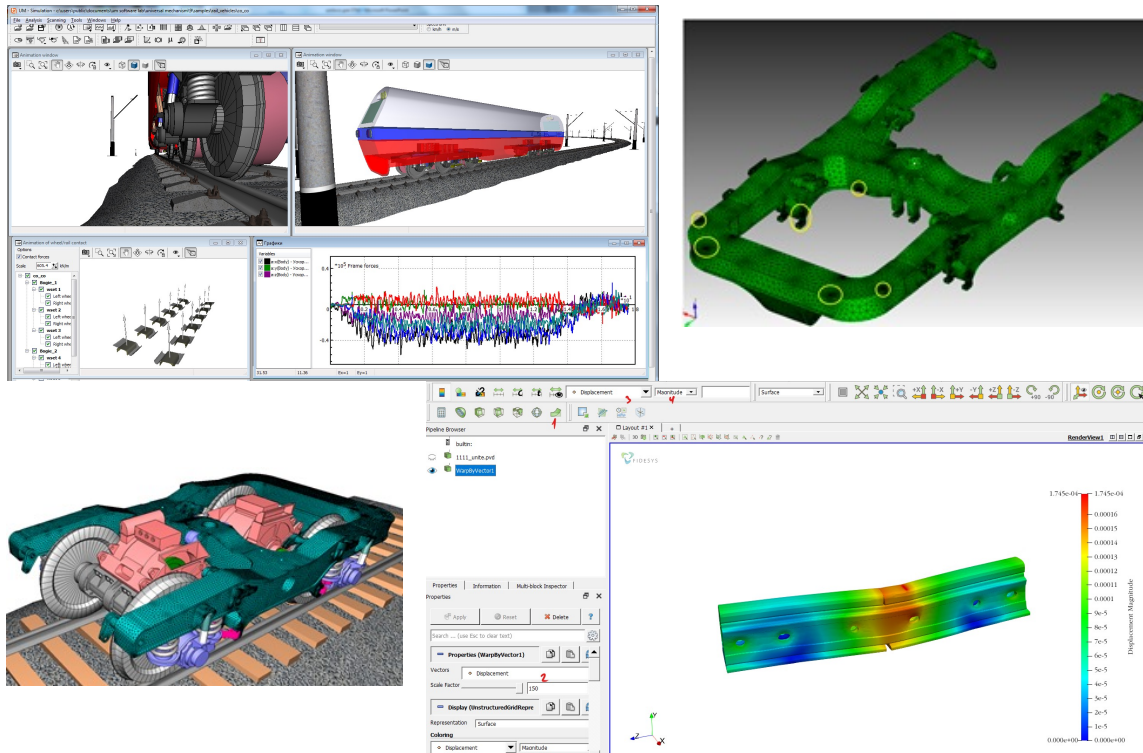
- ✓ Решение связанных (FSI) задач;
- ✓ Интерфейс прямой интеграции между решателями;
- ✓ Использование независимых неконформных расчетных сеток в CFD и FEA решателях.





# Возможности CAE Fidesys

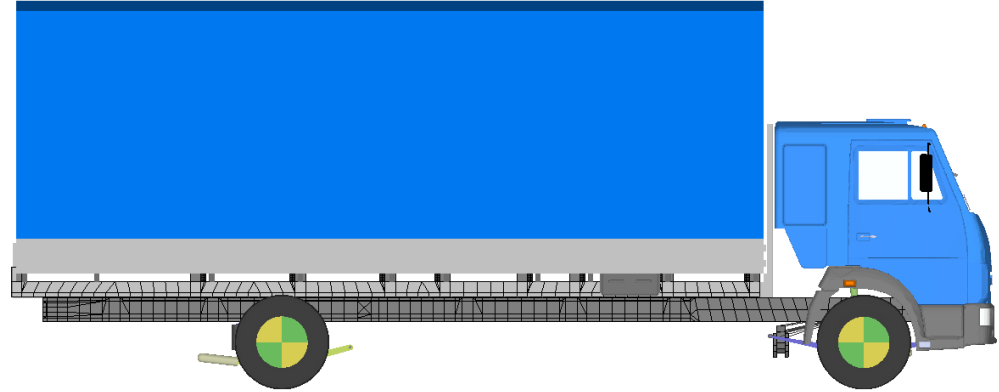
## Интеграция с Универсальный механизм



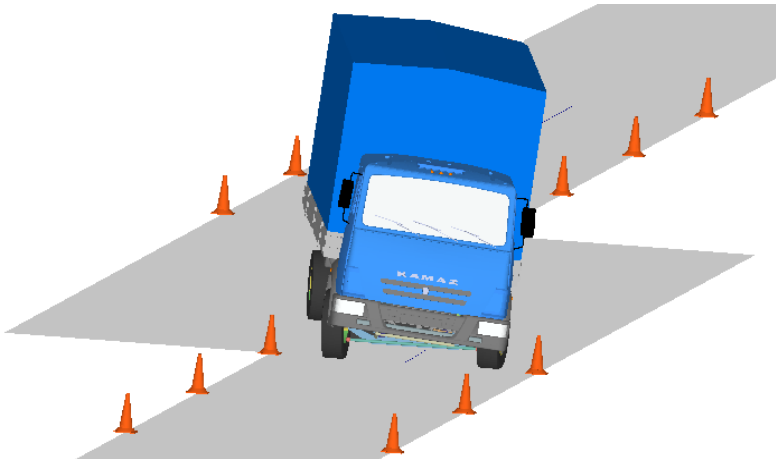
- ✓ Расчет динамики механических систем с учетом упругих деформаций отдельных частей;
- ✓ Прямая интеграция между пакетами на основе метода Крейга-Бэмптона;
- ✓ Учет изменения параметров движения и структуры механизма на напряженно-деформированное состояние детали



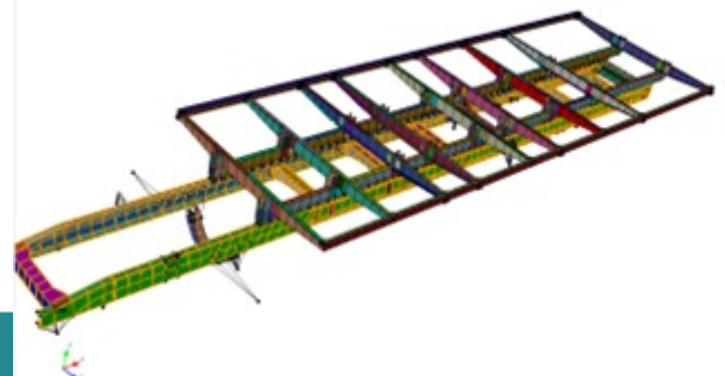
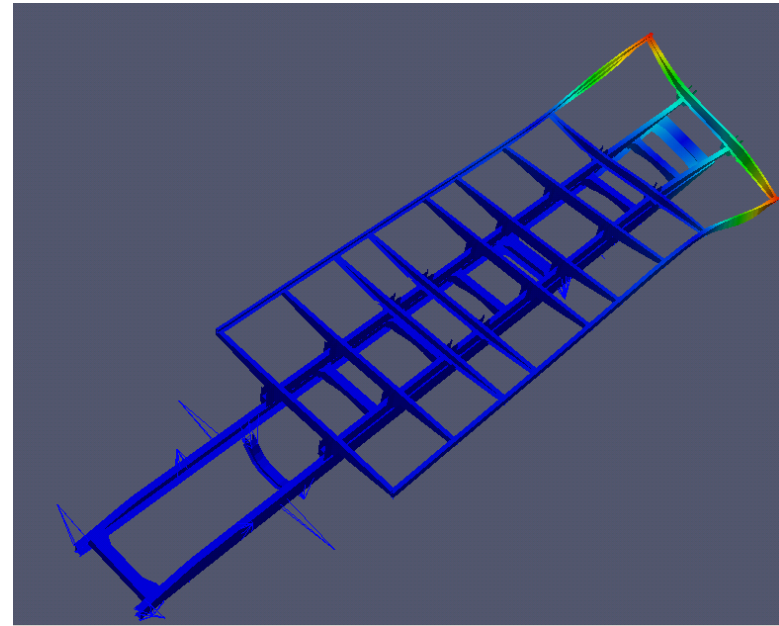
# Возможности CAE Fidesys



## Интеграция с Euler



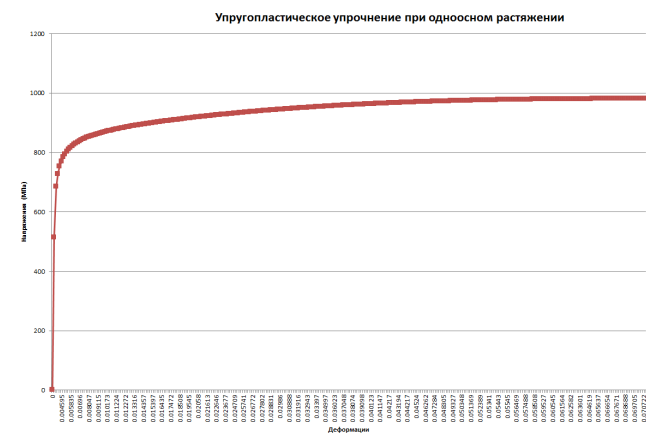
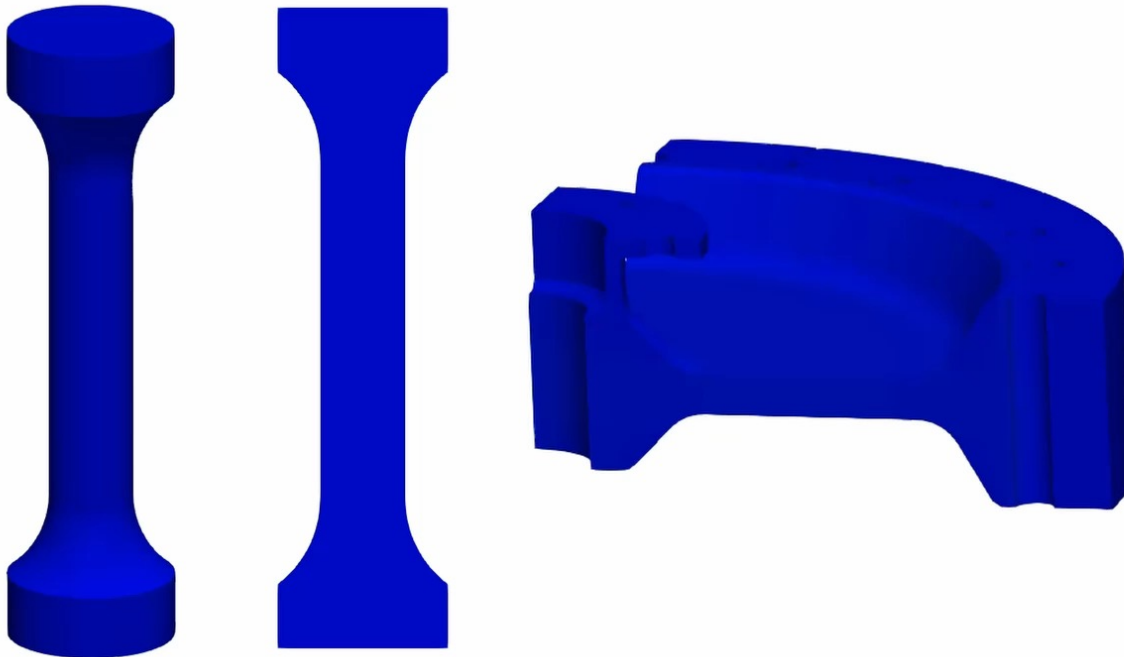
- Расчет динамики механических систем с учетом упругих деформаций отдельных частей;
- Прямая интеграция между пакетами на основе метода Крейга-Бэмптона;
- Учет изменения параметров движения и структуры механизма на напряженно-деформированное состояние детали



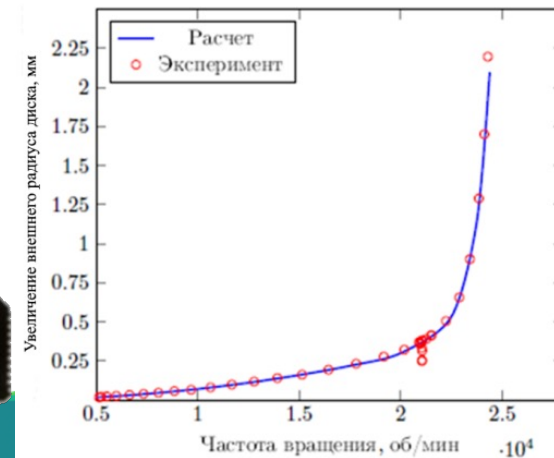


# Анализ прочности деформируемого твердого тела с учетом физической нелинейности

- Нелинейно упругие модели материалов (Мурнаган, Муни-Ривлин)
- Упругопластические модели (Мизес, Друкер-Прагер)
- Неассоциированный закон пластического течения
- Линейное/Полилинейное/Степенное упрочнение



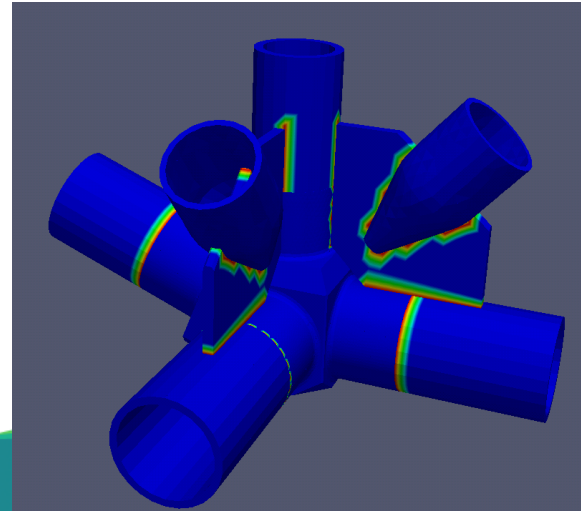
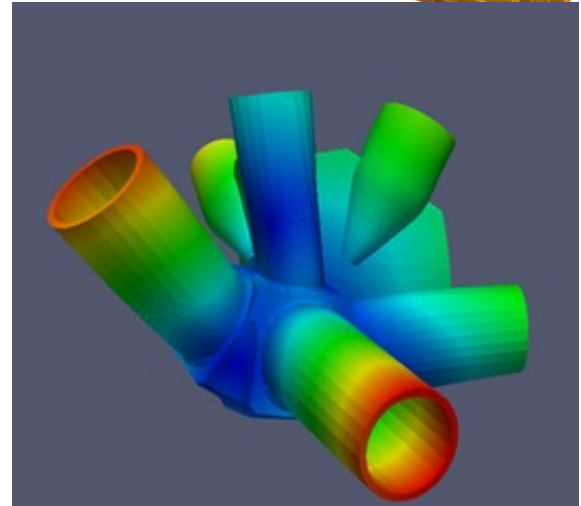
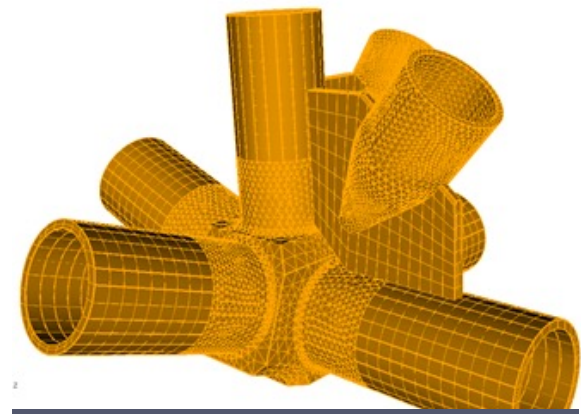
$$f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) \leq 0, \quad d\varepsilon_{ij}^p \leq d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}},$$





# Связанный контакт

- Расчет на неконформных сетках с нахлестами/зазорами между контактирующими телами => отпадает необходимость в предварительном упрощении/исправлении CAD-модели
- Непрерывность решения по перемещениям и напряжениям даже в случае зазоров/нахлестов!
- Автоматическое определение пятен контакта на основе настраиваемого зазора





# Связанный контакт

Граничные условия на контактной границе (Зенкевич, 2014):

$$x^1|_{AB} = x^2|_{AB} \quad t^1|_{AB} = -t^2|_{AB}$$

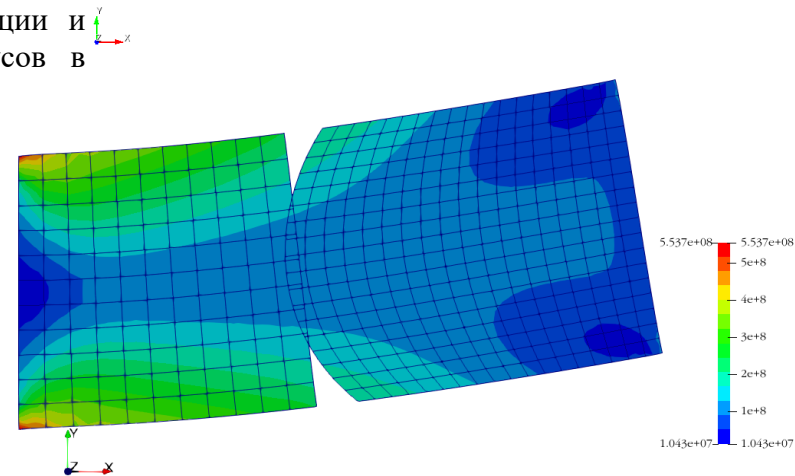
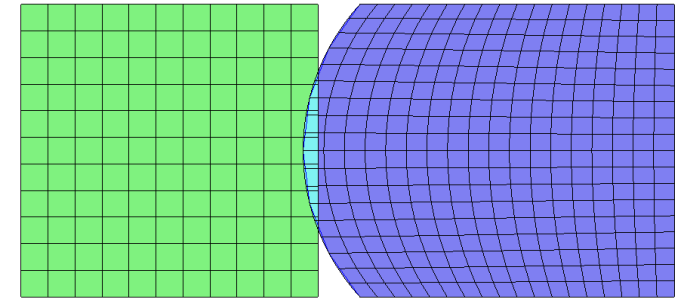
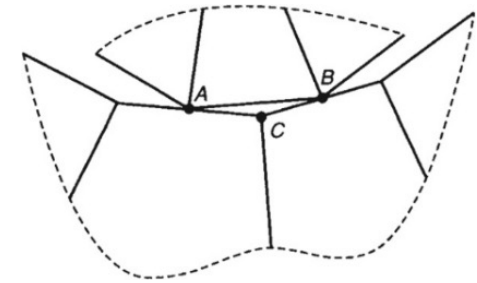
Связи на компоненты перемещений (обобщенные условия Дирихле):

$$x_s = F[x_m] = \sum_{i=0}^n N_i[\xi] x_m^i \Rightarrow u_s - \sum_j N_j[\xi] u_m^j = 0$$

## Условия для контактной пары:

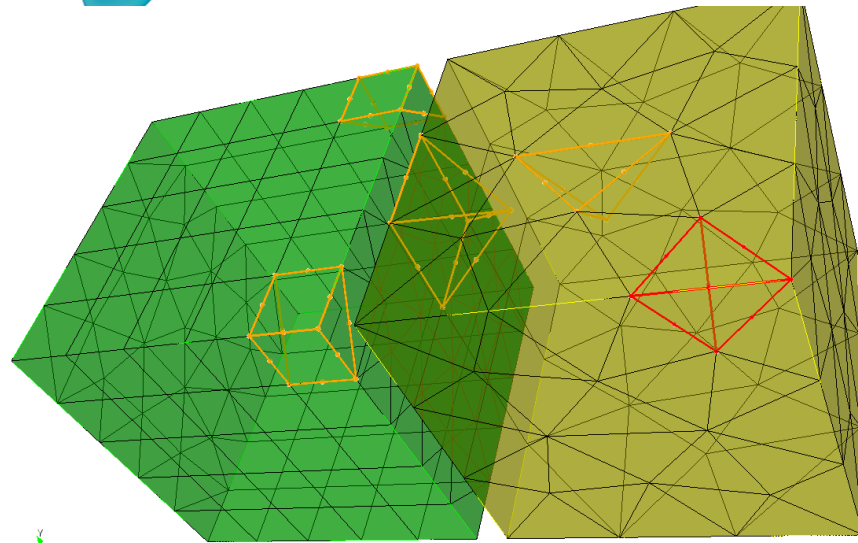
- узел и грань принадлежат разным телам для предотвращения самопроникновения;
- расстояние от узла до его проекции на грани меньше заданного зазора;
- проекция узла на плоскость грани находится внутри грани;
- угол между нормалью к ведущей поверхности в точке проекции и нормалью к ведомой поверхности больше заданного угла (180 градусов в идеальном случае).

Поскольку некоторые узлы могут стать как ведущими, так и ведомыми в уравнениях ограничений, необходимо устранить повторяющиеся ограничения, чтобы избежать переопределенной системы уравнений. Таким образом, полученная прямоугольная система уравнений ограничений может быть преобразована в редуцированную форму (RREF) с использованием методов линейной алгебры для трапецидации прямоугольной разреженной матрицы (например, с использованием QR-факторизации). В результате ведомые степени свободы будут отделены от основных степеней свободы и используются для дальнейшего процесса исключения неизвестных (Shepard 1984).

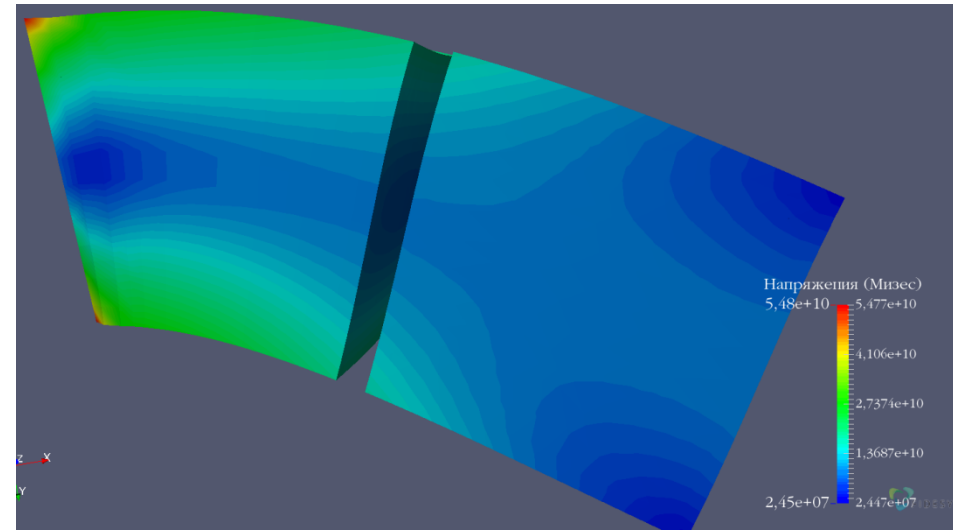




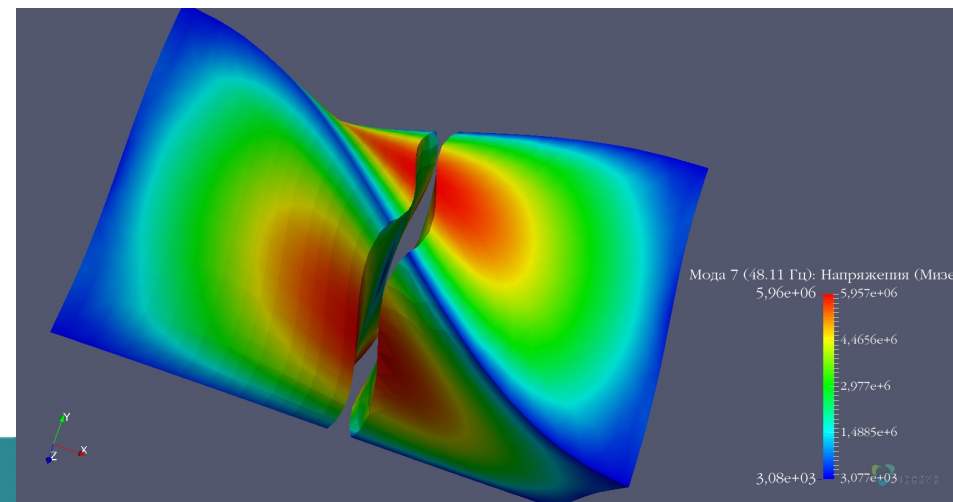
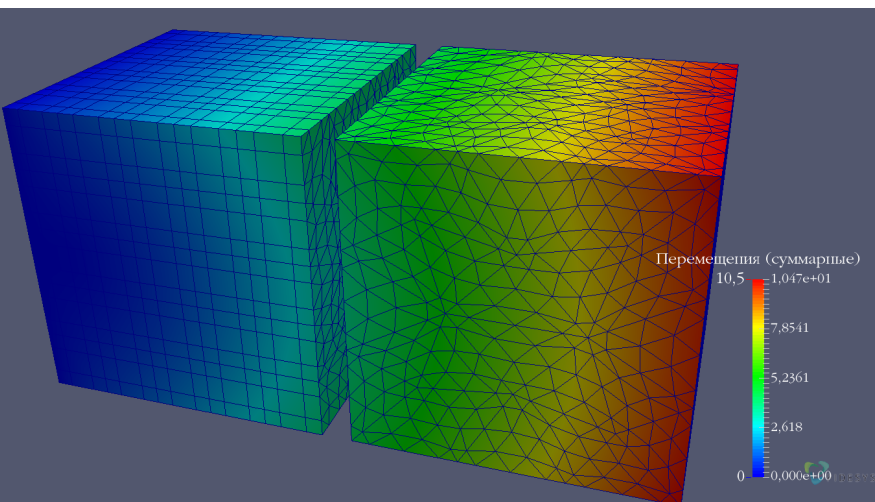
# Связанный контакт: пример



Неконформная сетка из спектральных элементов смешанного типа и различных порядков



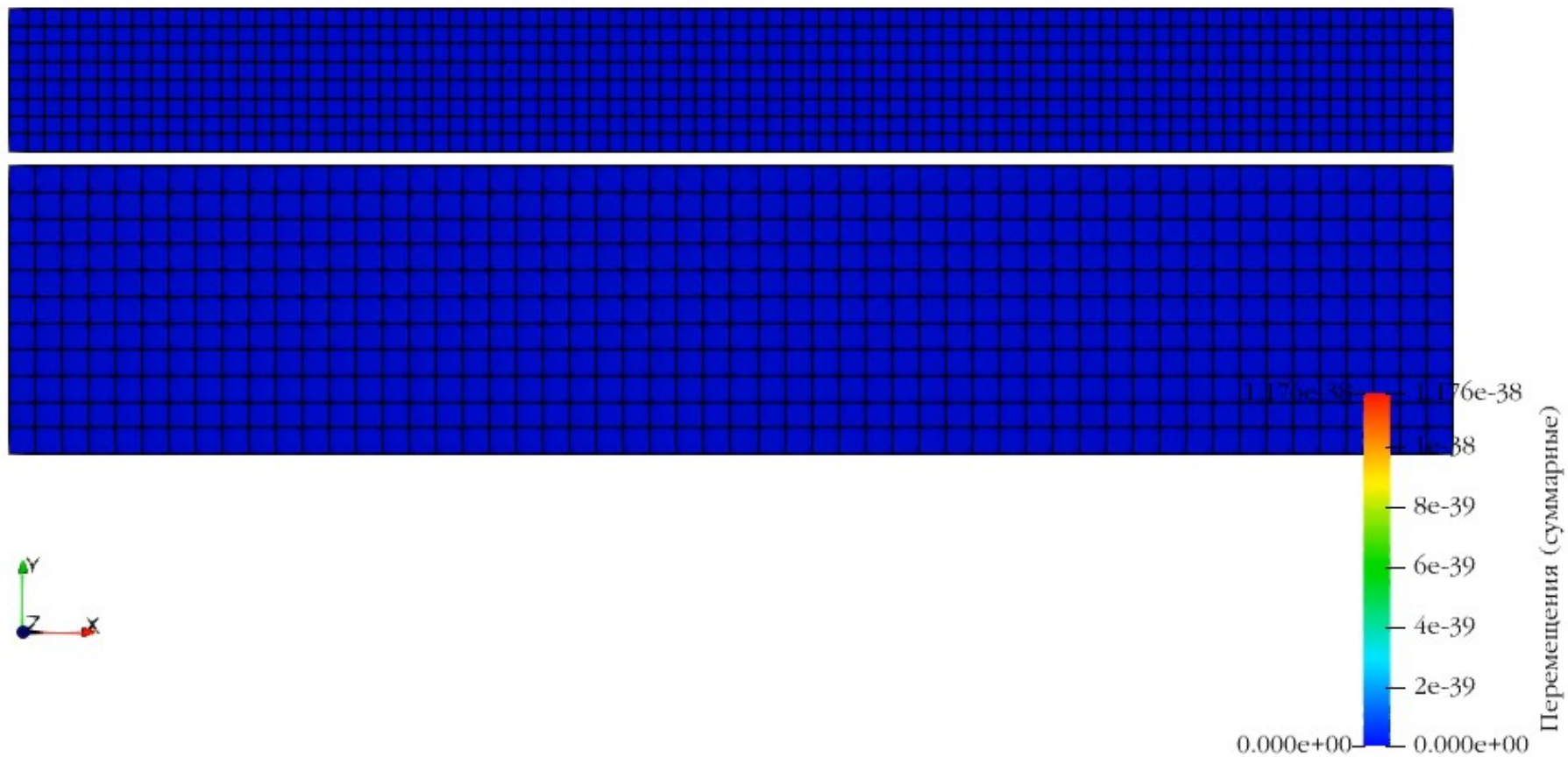
Непрерывность решения задачи даже при наличии зазора между телами





# Полноволновое моделирование контактного взаимодействия

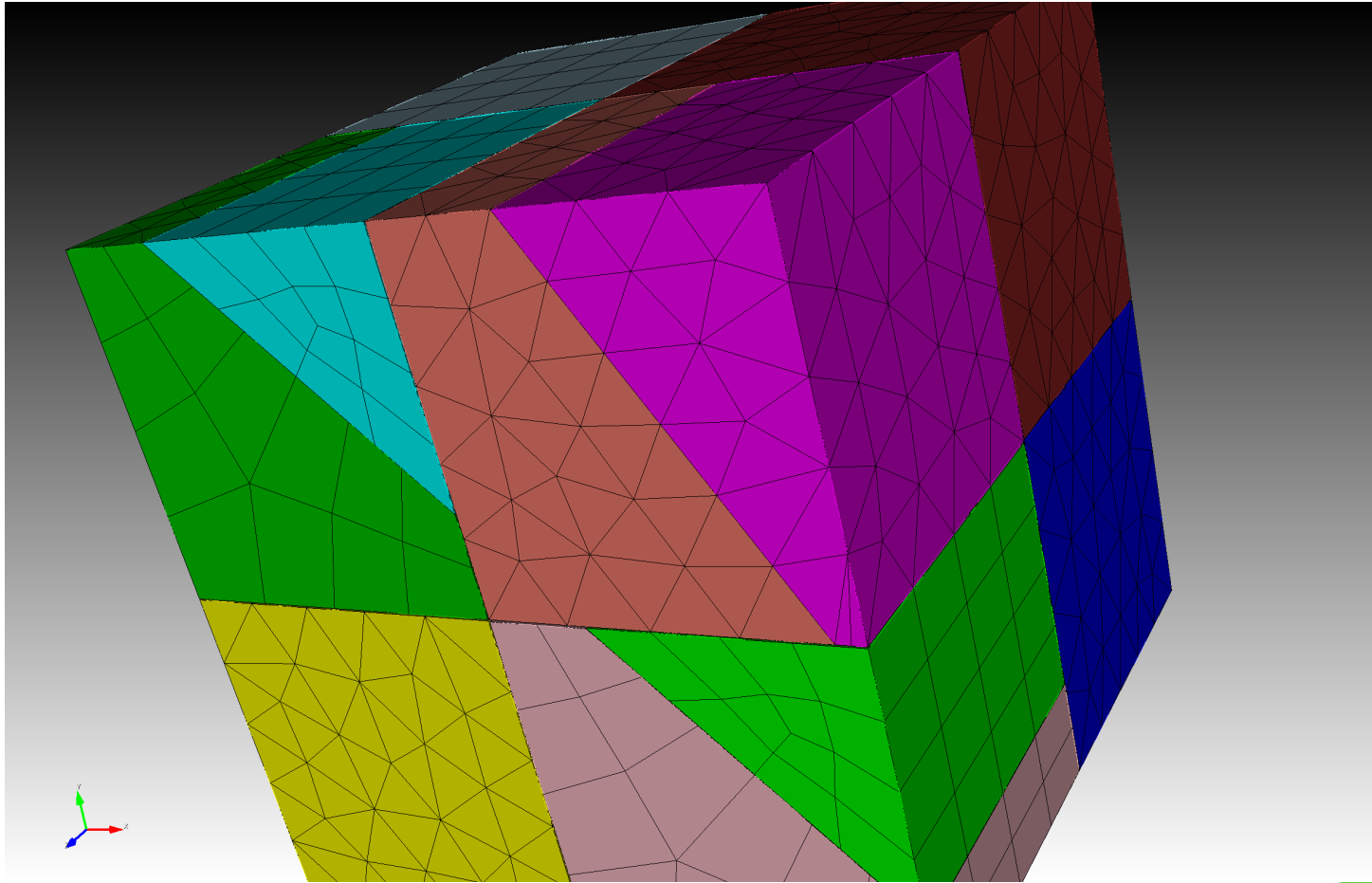
FIDESYS





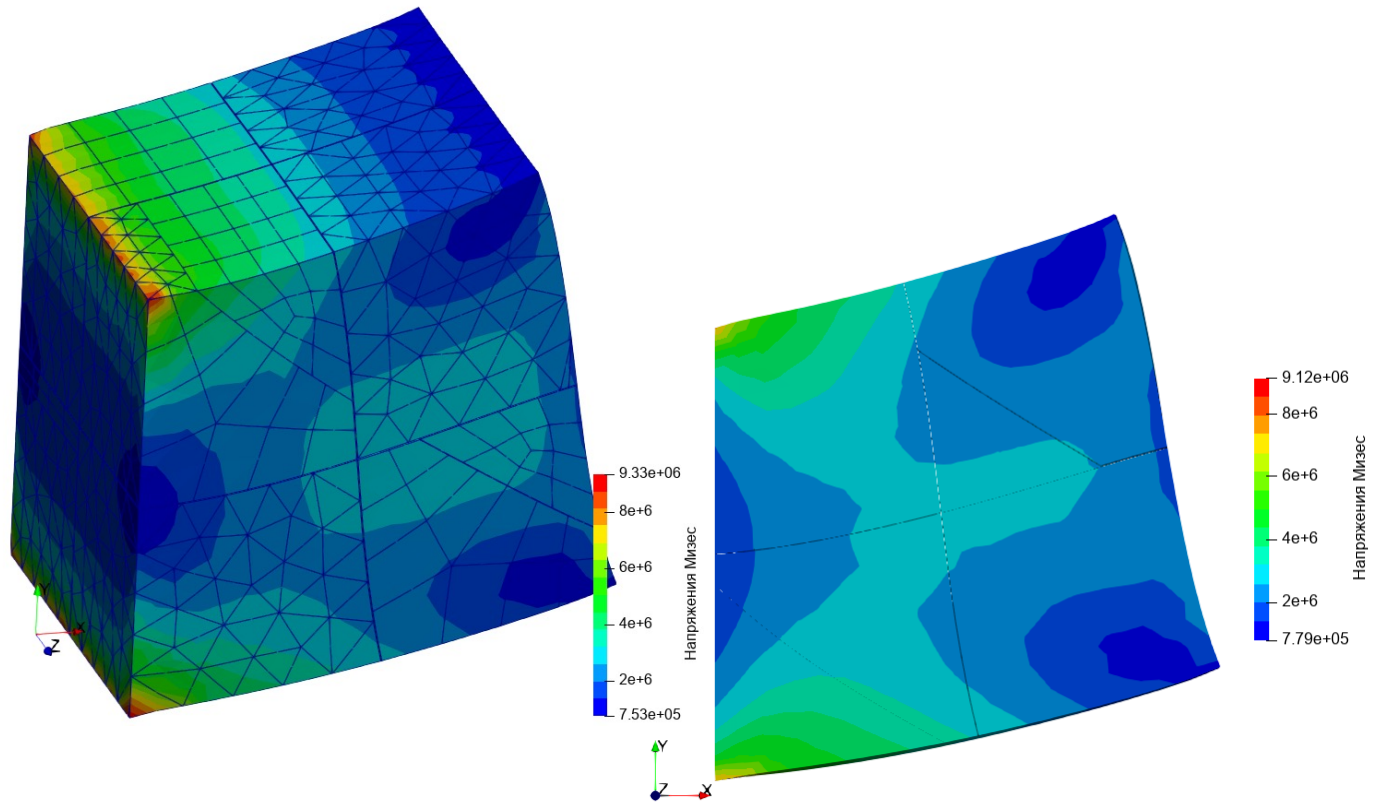


# Множественный контакт



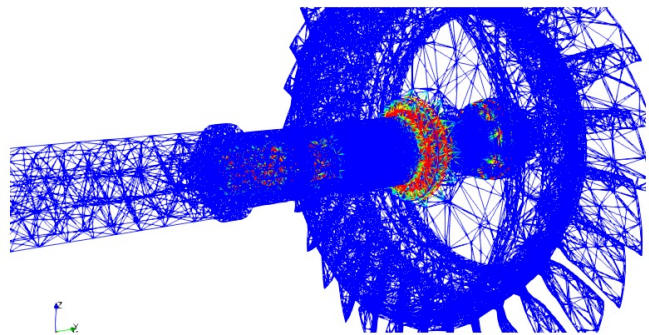


# Изолинии напряжений при изгибе

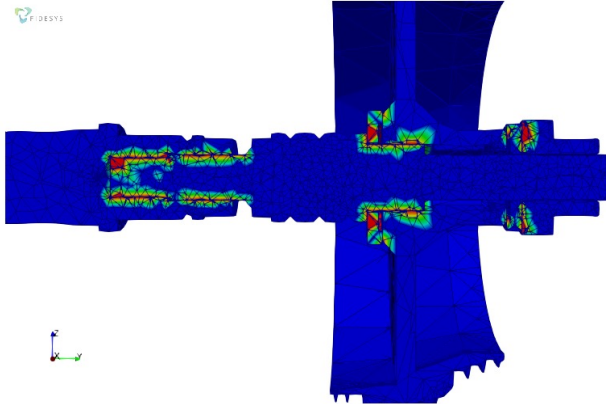




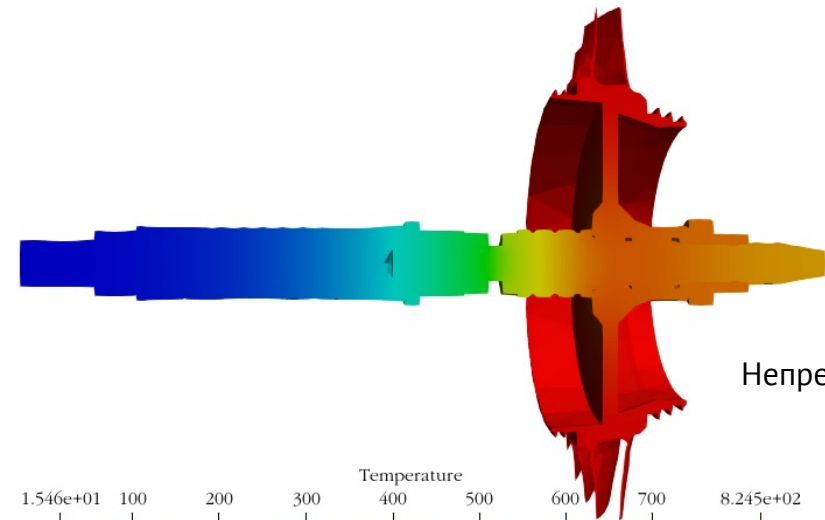
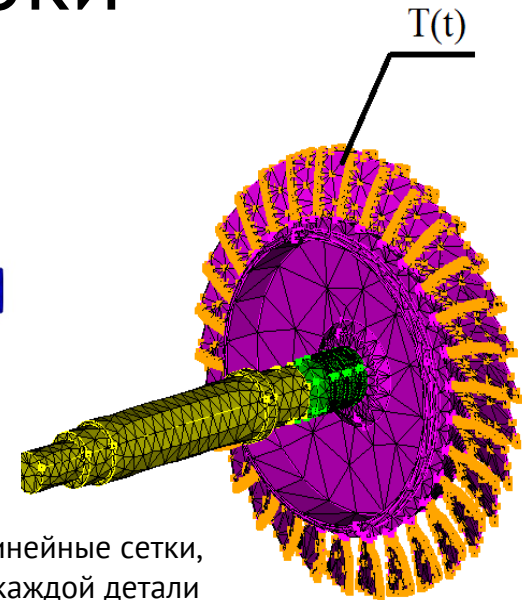
# Промышленный пример: Тепловой анализ роторной сборки



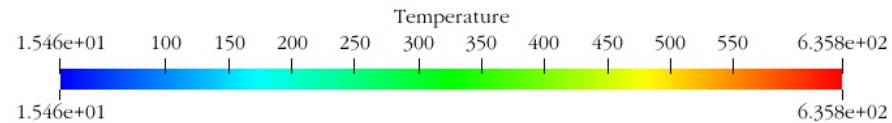
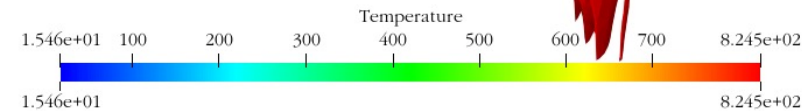
Автоматически определенные зоны контакта



Неструктурированные криволинейные сетки, построенные независимо в каждой детали сборки



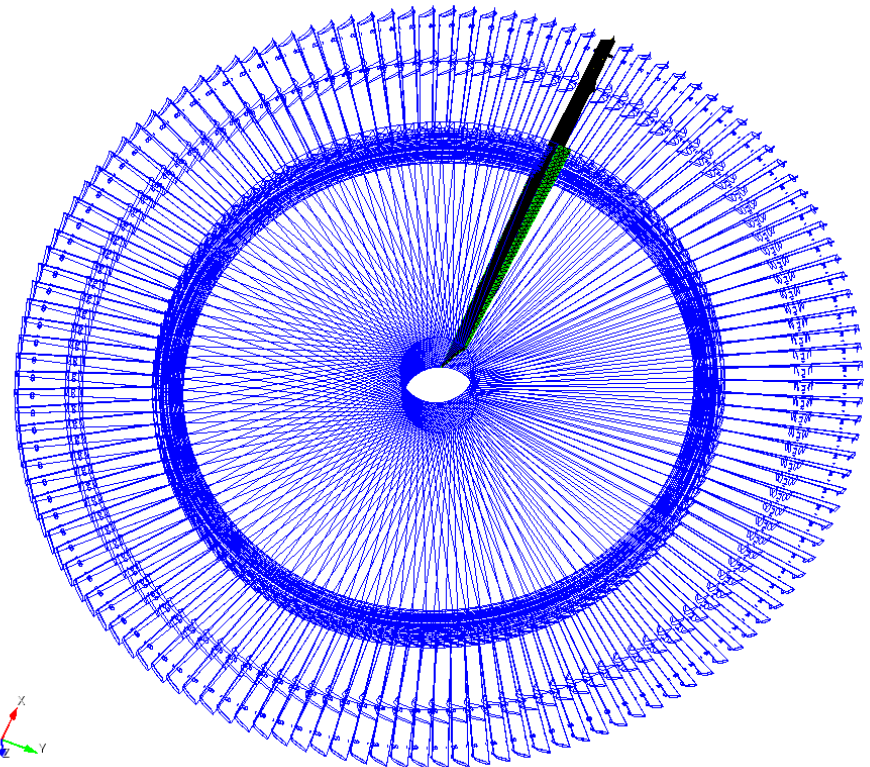
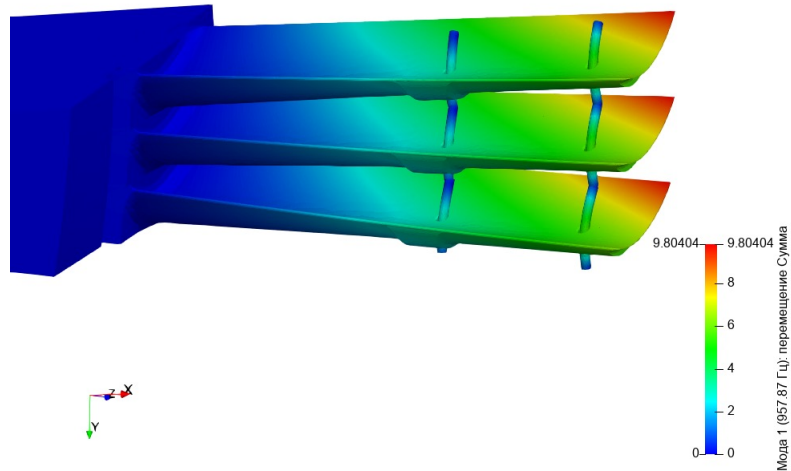
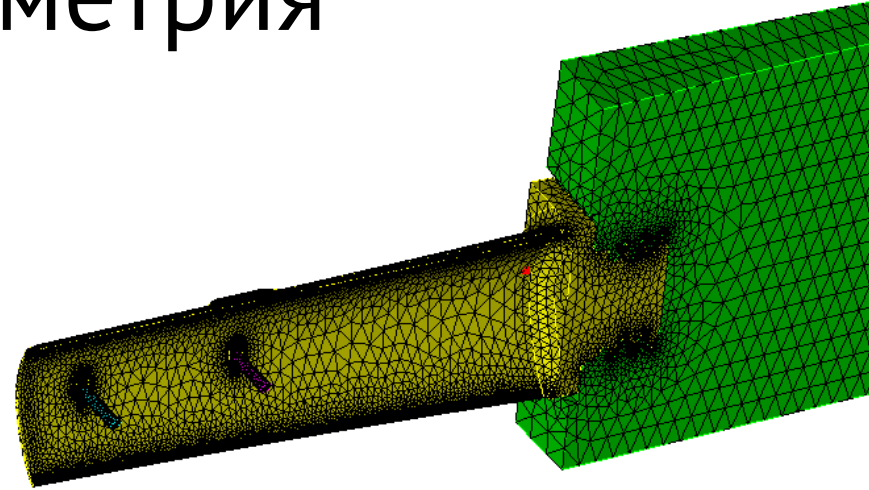
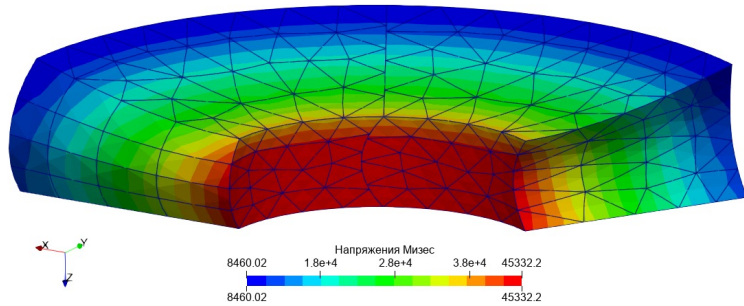
Непрерывные температурные поля





# Циклическая симметрия

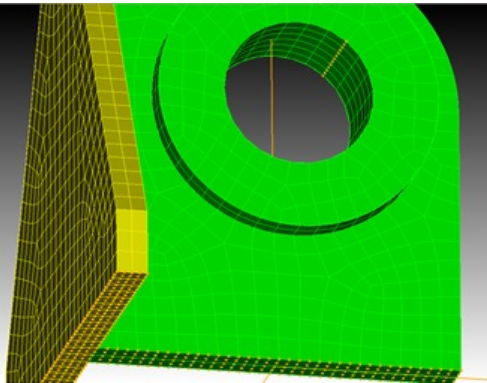
Поддержка неконформных криволинейных сеток для задания периодических граничных условий.



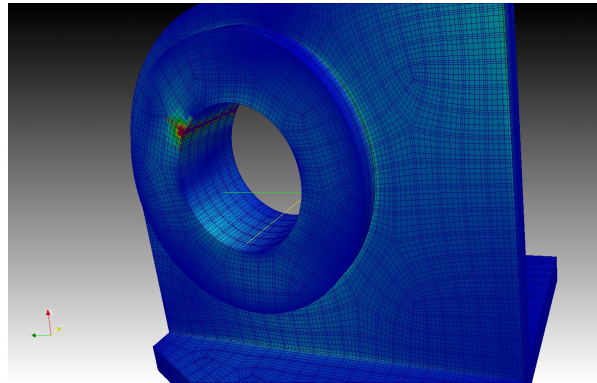


# Высокоточная дискретизация по пространству Метод Спектральных Элементов (МСЭ)

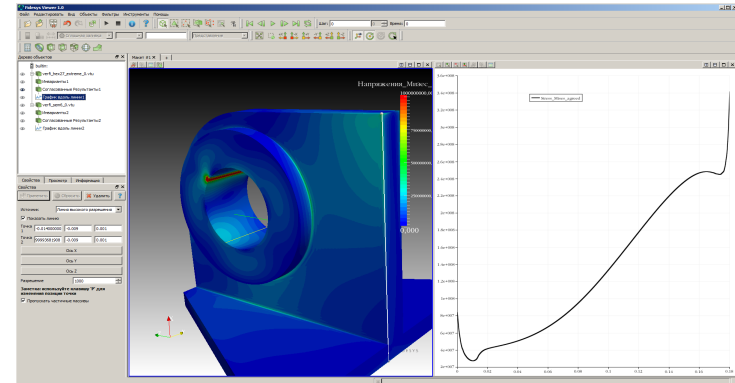
- Высокая точность и устойчивость процесса решения в нелинейных задачах
- Автоматизация анализа на сеточную (численную) сходимость
- Экспоненциальное повышение точности решения с ростом порядка схемы



Определение напряжений и деформаций  
в палубной проушине



Спектральноэлементная сетка



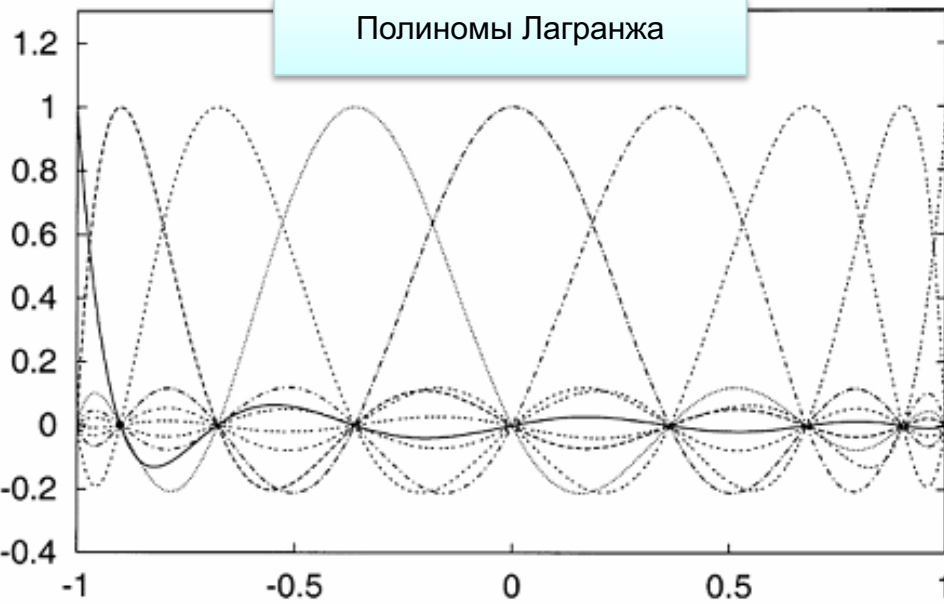
Напряжения в закреплении



# Метод спектральных элементов

Левин В. А., Вершинин А. В. Численные методы. Параллельные вычисления на ЭВМ Т.2 (Нелинейная вычислительная механика прочности. Цикл монографий в 5 томах под. ред. В.А. Левина). — ФИЗМАТЛИТ Москва, 2015. — 544 с.

Базисные функции в 1D – восстановленные полиномы Лагранжа по корням полиномов Лежандра



$$l_{\alpha}^{n_l}(\xi) = \frac{(\xi - \xi_0) \dots (\xi - \xi_{\alpha-1}) (\xi - \xi_{\alpha+1}) \dots (\xi - \xi_{n_l})}{(\xi_{\alpha} - \xi_0) \dots (\xi_{\alpha} - \xi_{\alpha-1}) (\xi_{\alpha} - \xi_{\alpha+1}) \dots (\xi_{\alpha} - \xi_{n_l})}$$

$\xi_{\alpha}$  – GLL – узлы

$$l_{\alpha}^{n_l}(\xi_{\beta}) = \delta_{\alpha\beta}$$

Ортогональный базис в GLL-квадратуре

$$\int_{-1}^1 l_m(\xi) l_n(\xi) d\xi = \frac{2}{2n+1} \delta_{mn}$$

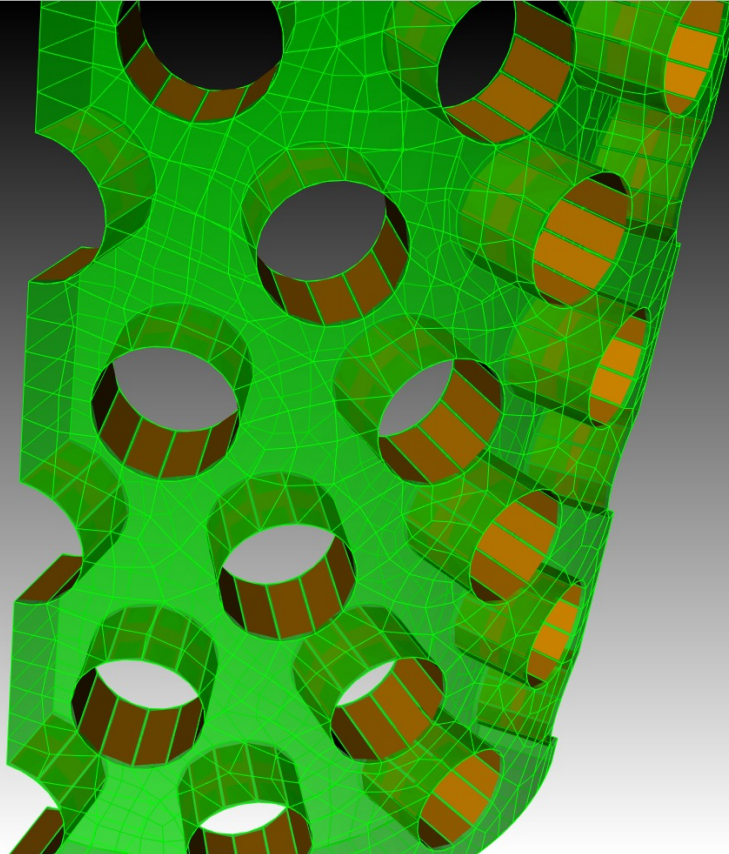
$$f(\mathbf{x}(\xi, \eta, \zeta)) \approx \sum_{\alpha, \beta, \gamma=0}^{n_l} f^{\alpha\beta\gamma} l_{\alpha}(\xi) l_{\beta}(\eta) l_{\gamma}(\zeta)$$

Разложение функции и ее производной по базису в 3D

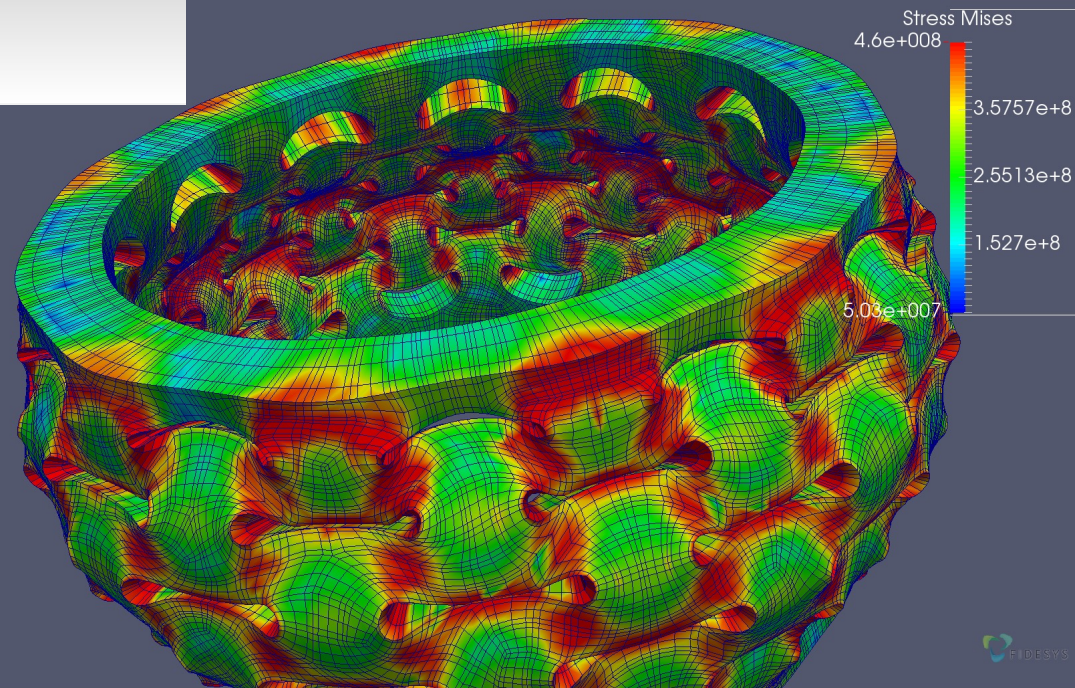
$$\nabla f(\mathbf{x}(\xi, \eta, \zeta)) \approx \sum_{i=1}^3 \mathbf{e}_i \sum_{\alpha, \beta, \gamma=0}^{n_l} f^{\alpha\beta\gamma} [l_{\alpha}'(\xi) l_{\beta}(\eta) l_{\gamma}(\zeta) \partial_{\xi} \xi \square l_{\alpha}(\xi) l_{\beta}'(\eta) l_{\gamma}(\zeta) \partial_{\eta} \eta \square l_{\alpha}(\xi) l_{\beta}(\eta) l_{\gamma}'(\zeta) \partial_{\zeta} \zeta]$$

$$\int_{\Omega_e} f(\mathbf{x}) d^3 \mathbf{x} \square \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\mathbf{x}(\xi, \eta, \zeta)) J_e(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta \approx \sum_{\alpha, \beta, \gamma=0}^{n_l} \omega_{\alpha} \omega_{\beta} \omega_{\gamma} f^{\alpha\beta\gamma} J_e^{\alpha\beta\gamma}$$

# Криволинейная сетка в препроцессоре



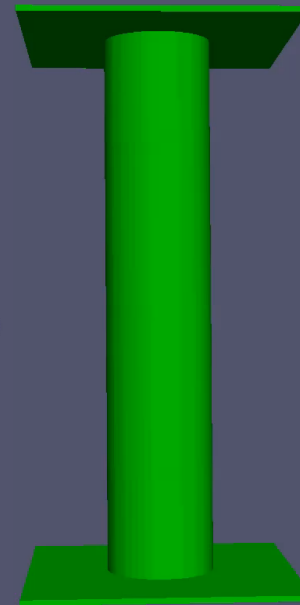
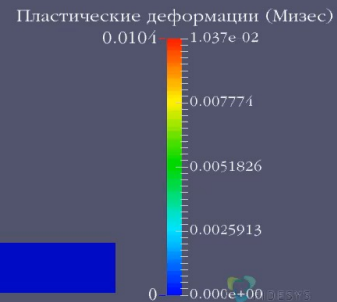
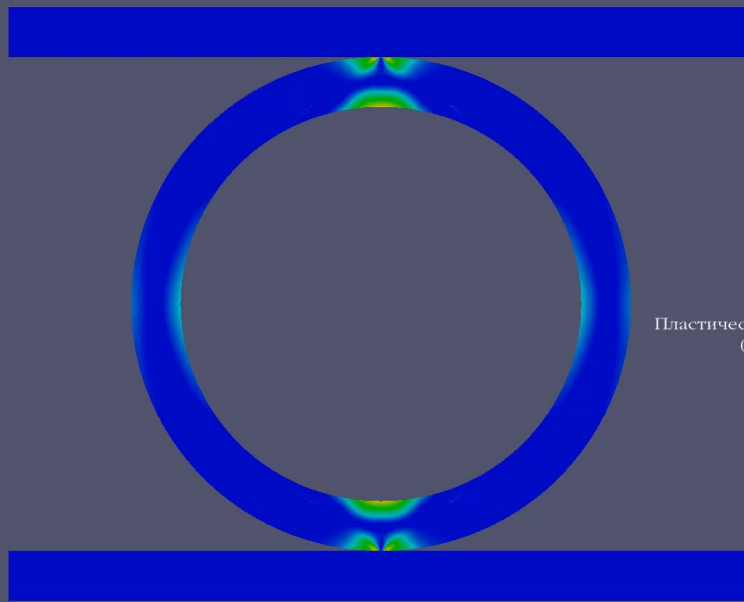
Результаты расчета  
на спектральных  
элементах в  
постпроцессоре





# Комплексные нелинейные задачи

- Учет одновременно трех видов нелинейных эффектов
- Множественный самоконтакт в процессе деформирования
- Возникновение и развитие полос локализации пластических деформаций
- Закритическое моделирование при больших упругопластических деформациях







# Требования по дискретизации

Максимизация длины самого короткого ребра при дискретизации границ криволинейных подобластей.

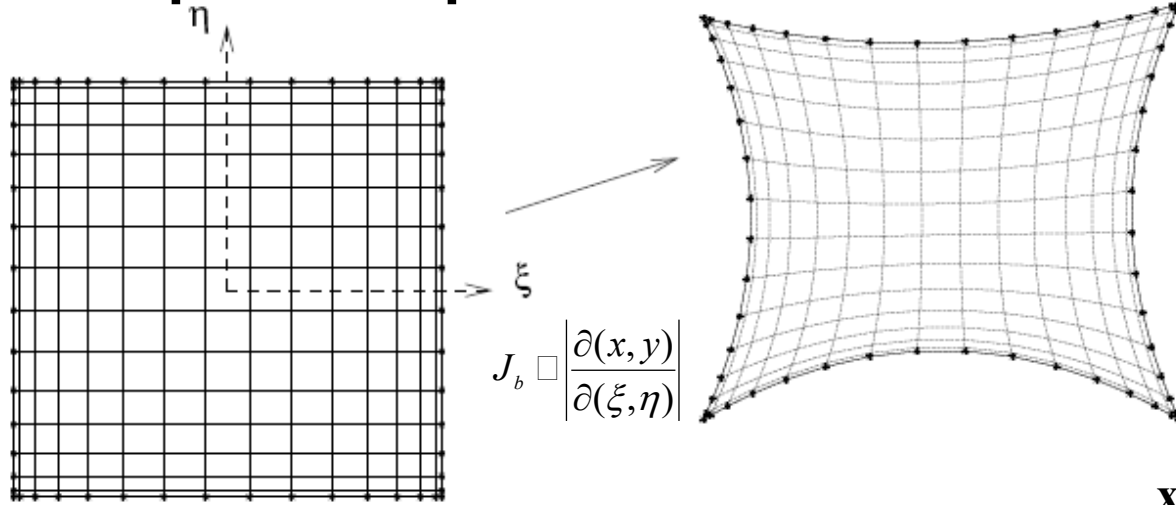
условие Куранта:

$$\Delta t \leq C \min_{\Omega_e \in \Omega} \frac{h^e}{V_{\max}^e}$$





# Изопараметрический МСЭ



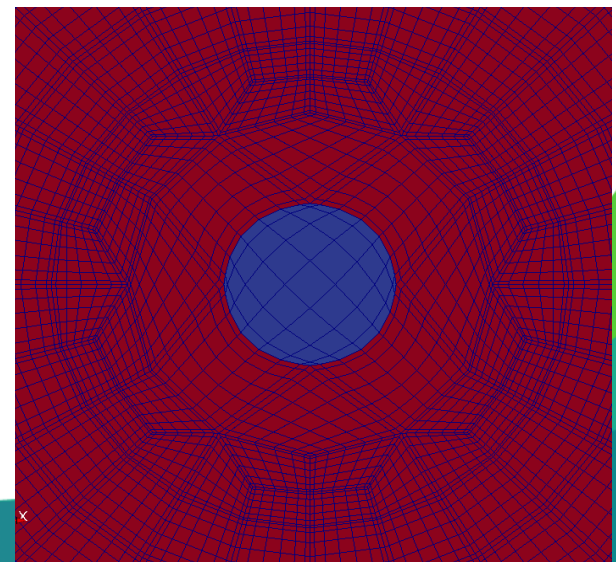
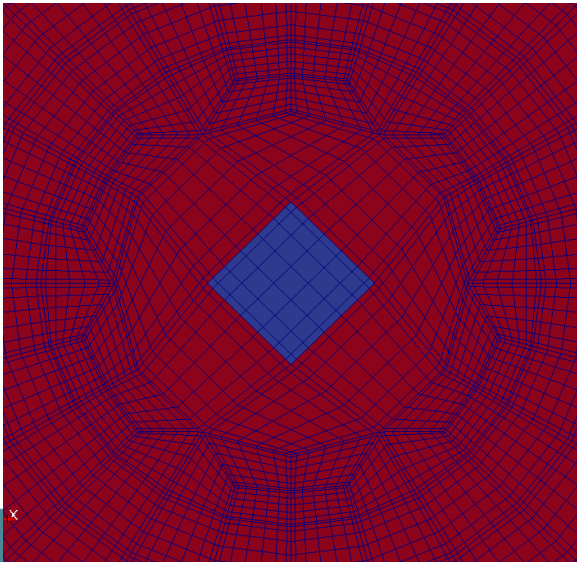
Отображение эталонного элемента на криволинейный спектральный элемент высокого порядка с использованием базисных функций МСЭ – изопараметрическая аппроксимация.

$$\mathbf{x}(\xi) = \sum_{a=1}^{n_a} l_a(\xi) \mathbf{x}_a$$

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \xi} = \sum_{a=1}^{n_a} \frac{\partial l_a}{\partial \xi} \mathbf{x}_a$$

Линейные (слева) и изопараметрические (справа) спектральные элементы

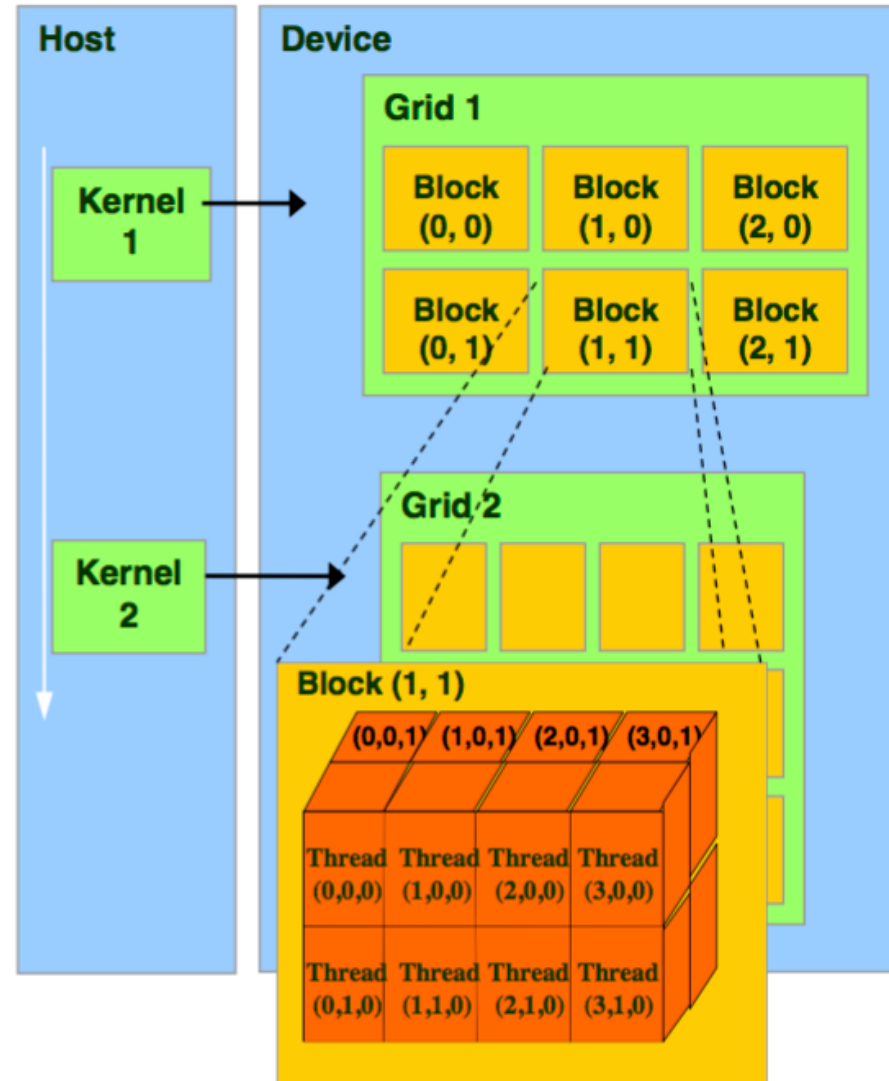
Спектральная сходимость (superconvergence, Bernardi and Maday 1992) на гладких решениях вычислительной схемы с минимальными численной дисперсией и диффузией (Komatitsch 1997):  $\|u - u_h\| \leq Ch^N e^{-N}$  в  $H^1$ -норме, где  $h$  – характерный размер сеточного элемента,  $N$  – порядок элемента,  $C$  – константа, не зависящая от  $h$  и  $N$ .





# Массивно-параллельная реализация на GPU

- Набор kernels: ассемблирование по пространству, интегрирование по времени, граничные условия
- МСЭ-сетка отображается на Grid-сетку: каждый спектральный элемент обрабатывается отдельным блоком (Block), а соответственно отдельные узлы внутри спектрального элемента отдельными потоками (Thread) => эффективное использование Shared (разделяемой) памяти для кэширования данных внутри элемента при вычислении пространственных производных
- Размер блока автоматически определяется порядком спектрального элемента, количество блоков постоянно при фиксированной сетке
- Использование атомарных операций при ассемблировании (сборке глобального вектора узловых сил и матрицы масс из локальных на элементах)





# Алгоритм интегрирования по времени

$$\begin{cases} M_u \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + M_{uw} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + C_u \frac{\partial u}{\partial t} + C_{uw} \frac{\partial w}{\partial t} + K_u(u, w) - F_u = 0 & M_u = \int_{\Omega} N^T \rho N d\Omega; M_{uw} = \int_{\Omega} N^T \rho_f N d\Omega; M_w = \int_{\Omega} N^T \frac{\alpha \rho_f}{\phi} N d\Omega \\ M_{uw} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + M_w \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + C_{uw} \frac{\partial u}{\partial t} + C_w \frac{\partial w}{\partial t} + K_w(u, w) - F_w = 0 & C_u = \int_{\Omega} N^T \rho d_u N d\Omega; C_{uw} = \int_{\Omega} N^T \rho_f d_{uw} N d\Omega; C_w = \int_{\Omega} N^T \frac{\alpha \rho_f}{\phi} d_w N d\Omega \end{cases}$$

$$K_u(u, w) = \int_{\Omega} \sigma(\nabla u, \nabla w) \cdot \nabla N d\Omega; K_w(u, w) = - \int_{\Omega} p_f(\nabla u, \nabla w) \nabla N d\Omega + \int_{\Omega} N^T \frac{\eta}{k} N d\Omega \frac{\Delta w}{\Delta T};$$

$$F_u = \oint_{\Gamma} N^T \sigma_n d\Gamma; F_w = \oint_{\Gamma} N^T P_f \vec{n} d\Gamma;$$

$\Delta T$  – физический шаг по времени;  $\Delta t$  – шаг по псевдовремени в методе установления (метод динамической релаксации)

Решение (векторы перемещений  $u, w$ ) на  $(n+1)$ -м шаге по времени в методе установления будем искать в следующем виде (явная схема Ньюмарка 2го порядка):

$$u(t_{n+1}) = u_{n+1} = u_n + v_{un} \Delta t + a_{un} \frac{\Delta t^2}{2}$$

$$w(t_{n+1}) = w_{n+1} = w_n + v_{wn} \Delta t + a_{wn} \frac{\Delta t^2}{2}$$

$$v_{un+1} = v_{un} + (1 - \beta) a_{un} \Delta t + \beta a_{un+1} \Delta t$$

$$v_{wn+1} = v_{wn} + (1 - \beta) a_{wn} \Delta t + \beta a_{wn+1} \Delta t$$

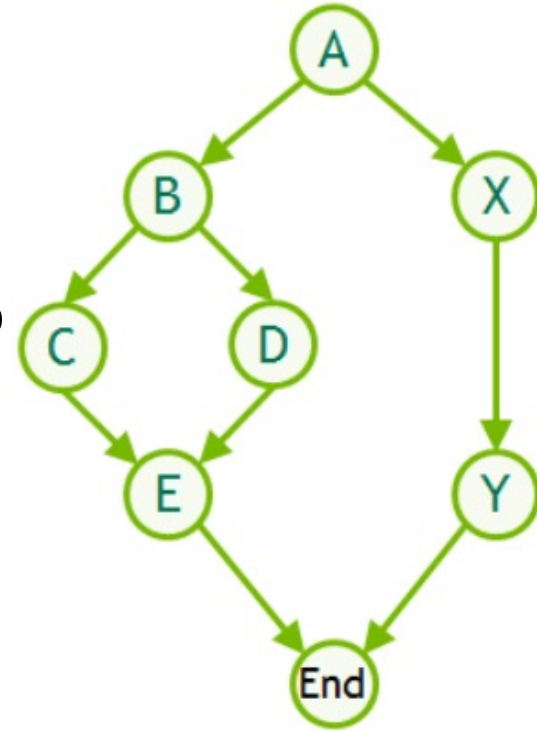
Схема условно (в соответствии с условием Куранта) устойчива при  $\beta = 0.5$



# Использование графов в CUDA 10

Применение метода Ньюмарка для численного интегрирования по времени подразумевает многократный (несколько десятков тысяч итераций по времени) вызов kernels.

Для оптимизации данной процедуры и сокращения накладных расходов на запуск kernels используются CUDA graphs – графы вызова kernels, позволяющие выполнять асинхронные запуски kernels и операций с памятью (memcpy/memset).



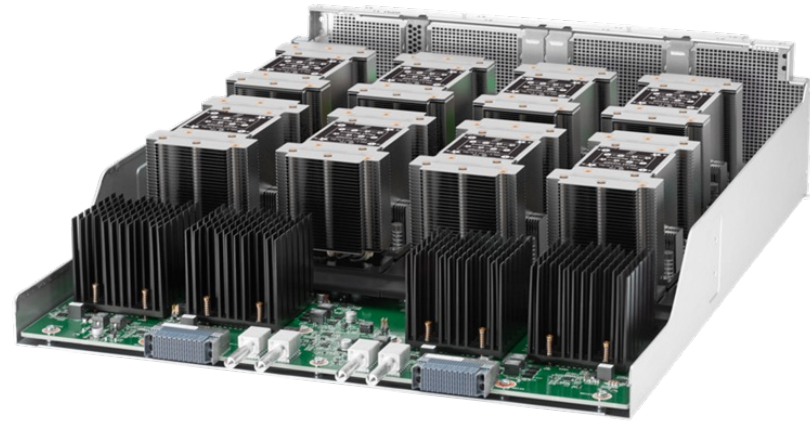


# Вычислительная платформа

(в рамках лаборатории вычислительной гидрогеомеханики  
кафедры вычислительной механики  
МГУ имени М.В. Ломоносова)

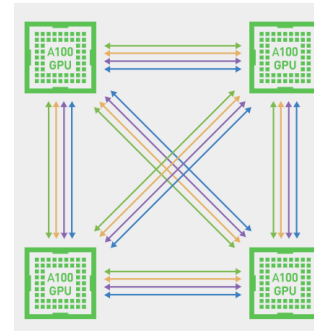
## HPE Apollo 6500 Gen10:

- 4xTesla A100 NVLink 3.0
- Пропускная способность памяти для обменов между GPU - **600 ГБ/с**
- Поддержка технологии NVIDIA Grid для удаленного запуска CUDA-приложений и 3D рендеринга



## NVIDIA Tesla A100:

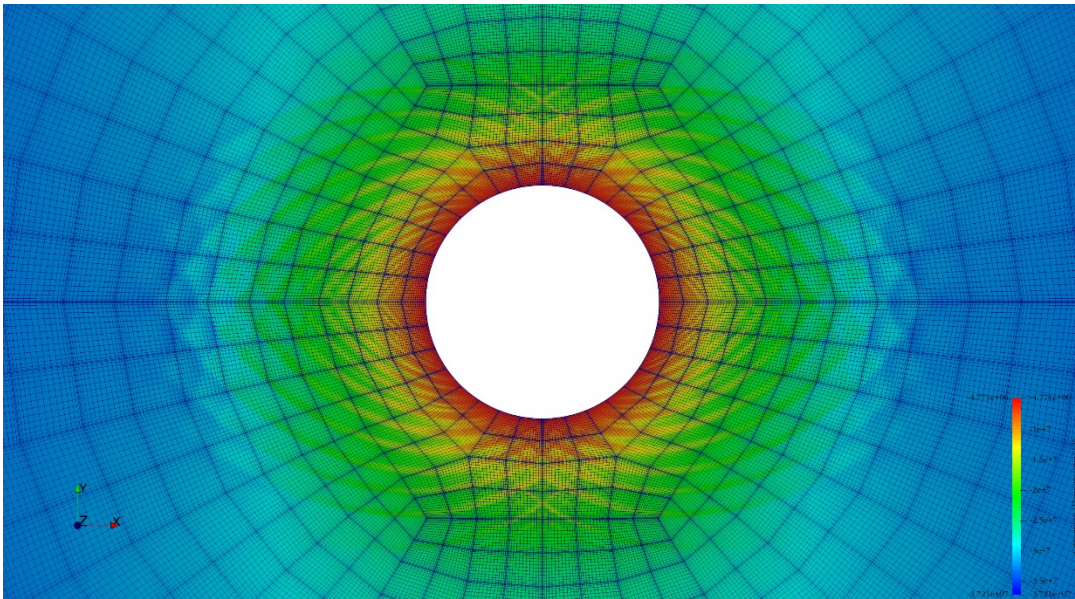
- Операции с двойной точностью - **9,7** Терафлопс
- Стековая память HBM2e объемом **80** Гб
- 108 мультипроцессоров, **6912** ядер CUDA
- Пропускная способность глобальной памяти - **2039** ГБ/с
- Поддержка CUDA 12



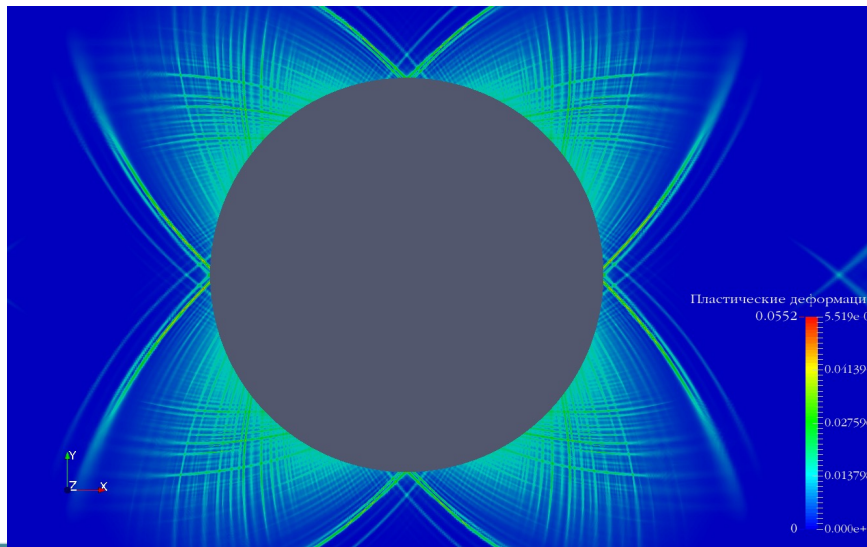
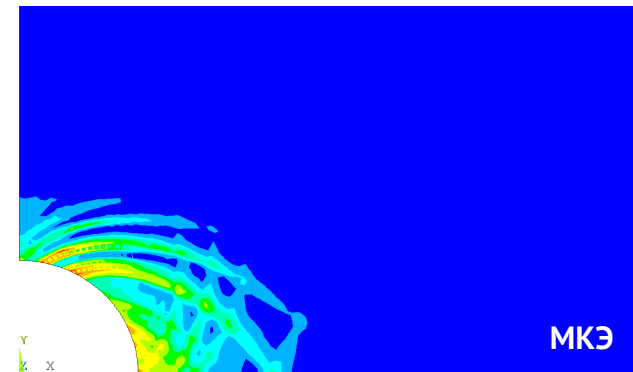
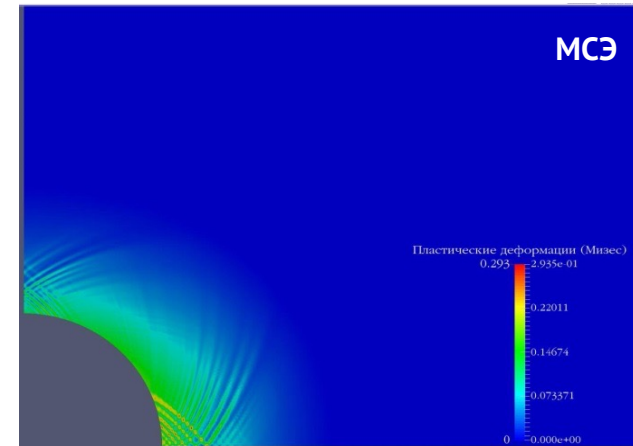


# Локализация упругопластических деформаций

Безмозгий И. М., Казакова О. И., Магжанов Р. М., Смердов А. А., Чернявский А. Г., Чернягин А. Г. Результаты тестирования и оценка возможности построения системы специализированных решений для прочностного анализа на базе программного комплекса Фидесис. Чебышевский сборник, 2017.



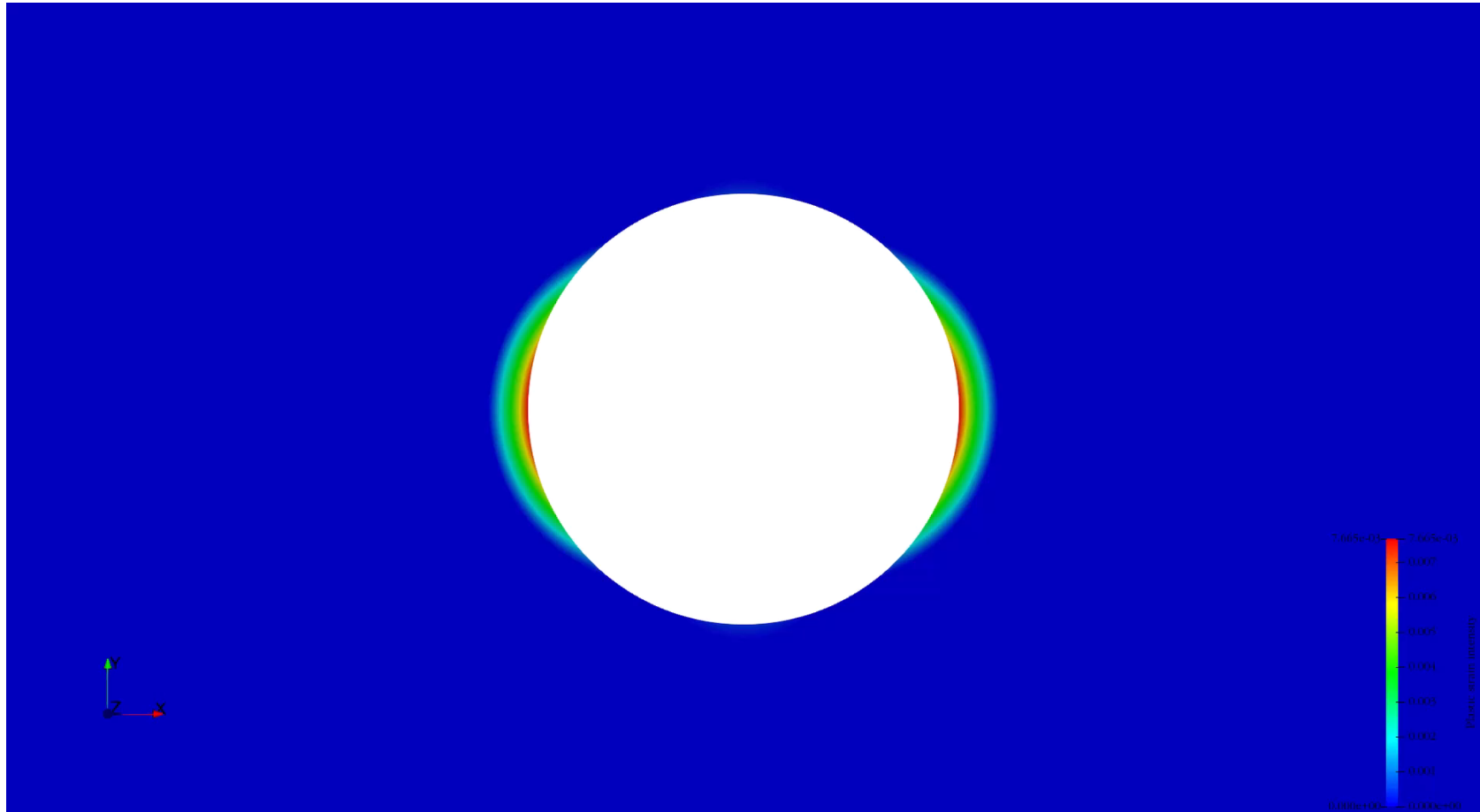
Метод спектральных элементов обеспечивает:  
более корректное решение задач с глубокой пластикой;  
– возможность уточнения КЭ моделей без перегенерации расчетных сеток



Расчет модели с образованием зон пластичности. МСЭ высокоточно моделирует образование и развитие полос скольжения Людерса.



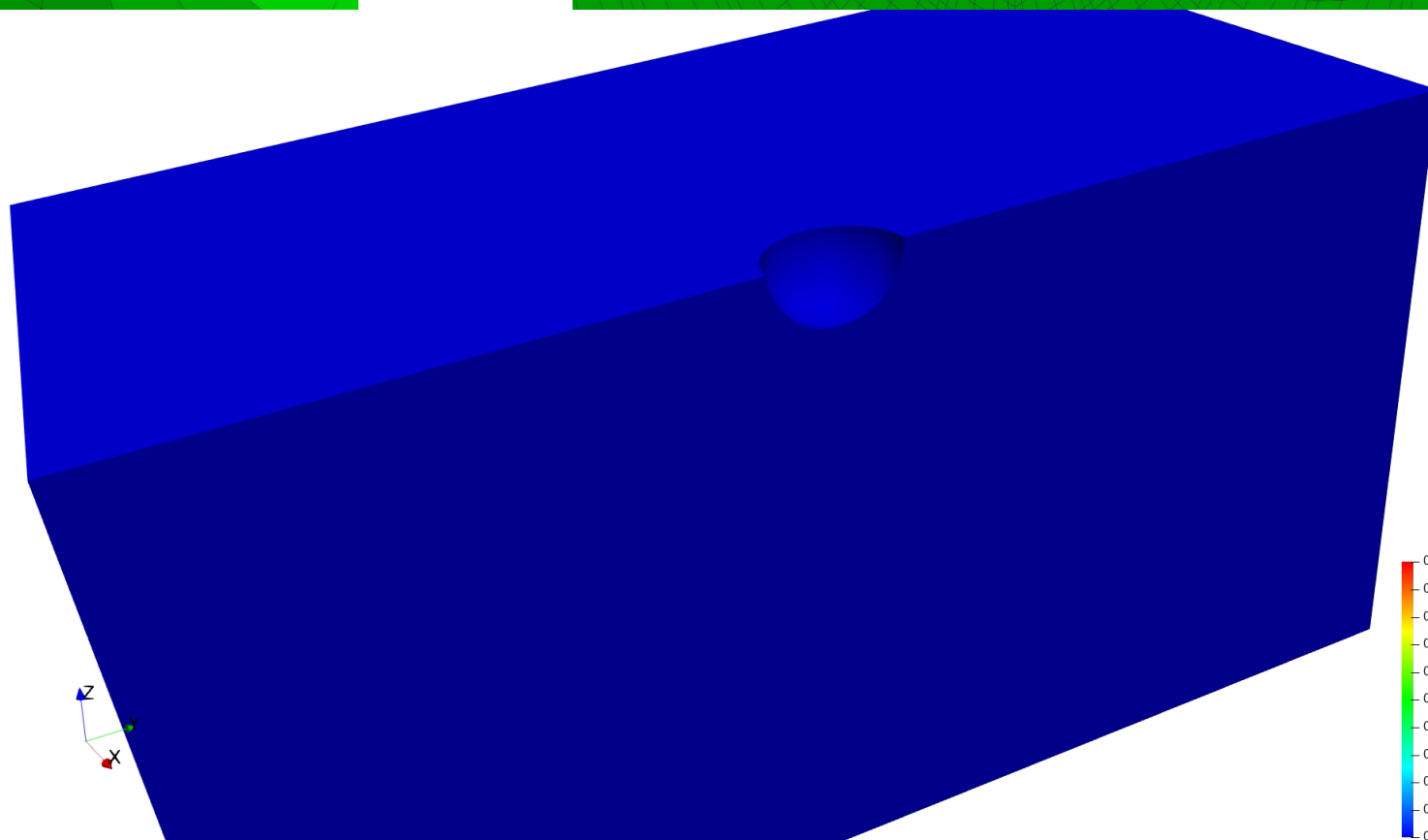
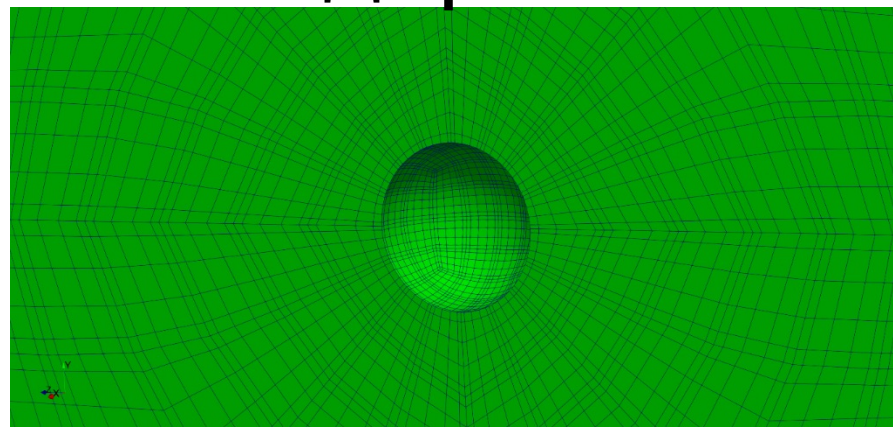
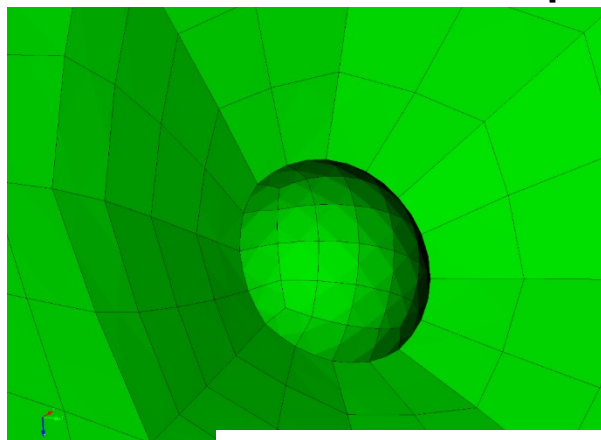
# Развитие полос локализации деформаций







# Локализация полос Людерса в 3D



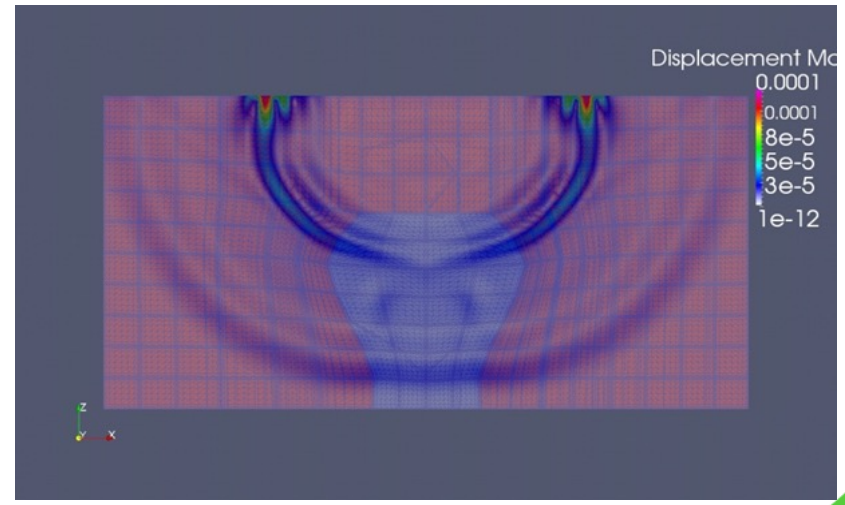
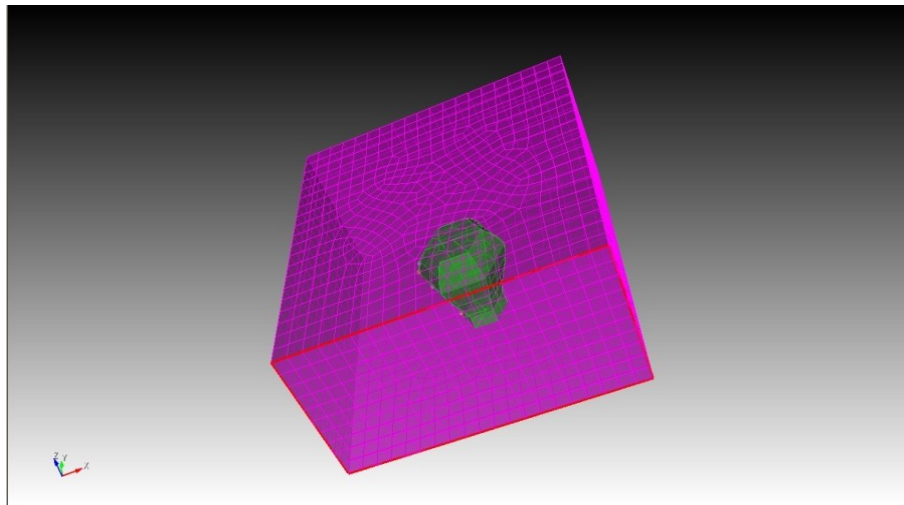


# Структура CAE Fidesys

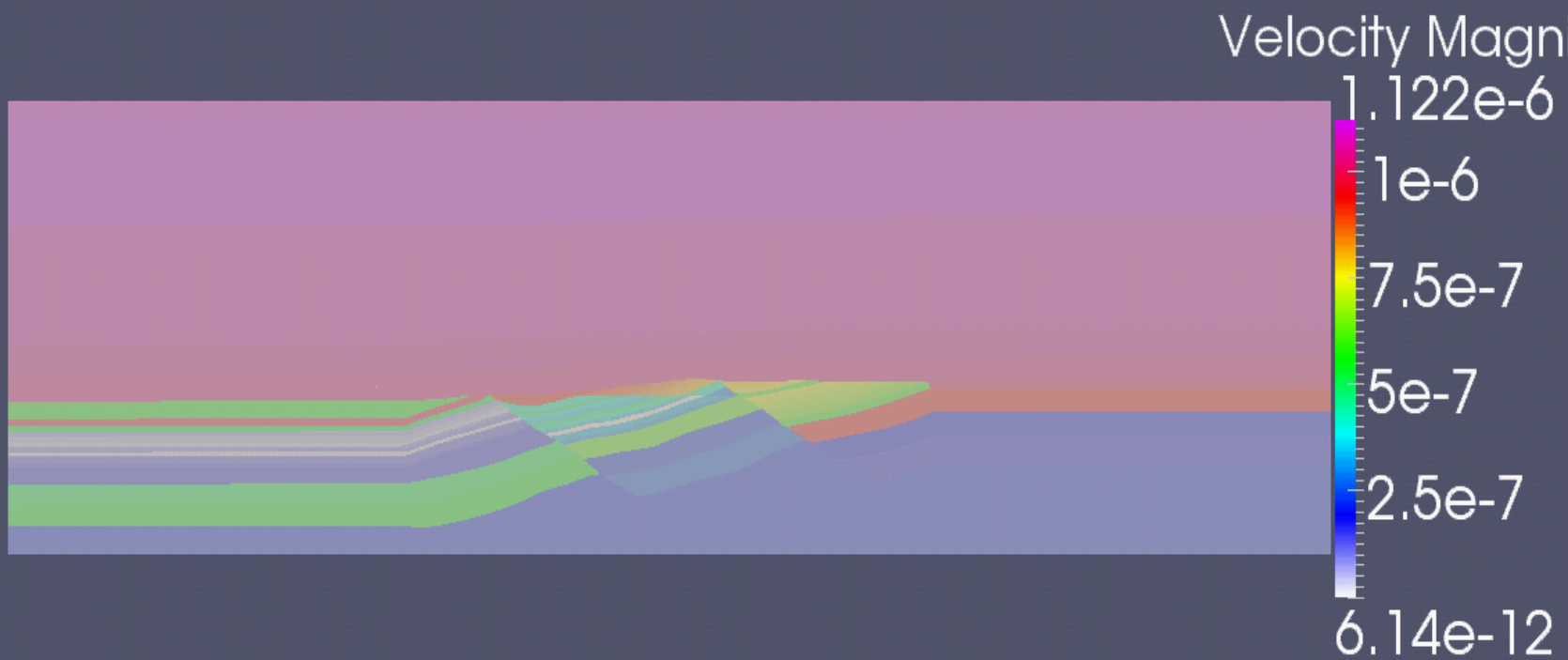
## Fidesys Dynamics

Метод спектральных элементов.  
Нестационарные задачи с высокой  
точностью

- Современная модификация МКЭ
- Наиболее эффективен для динамического анализа
- Расчет нестационарных задач с быстропротекающими процессами
- Повышенная скорость и точность расчета
- Возможность эффективного распараллеливания с применением модуля Fidesys HPC

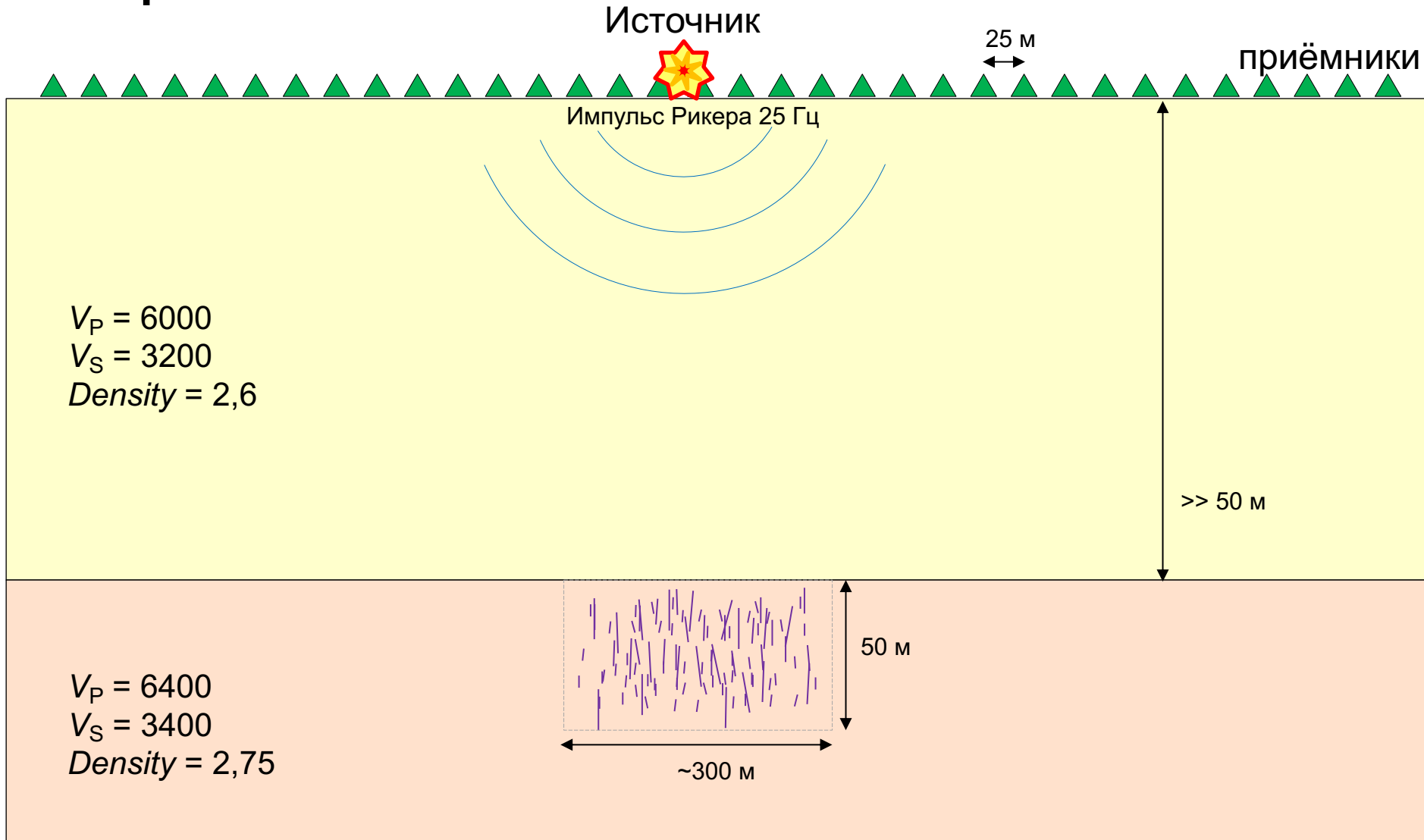


*Динамическая задача о моделировании сейсмических колебаний*





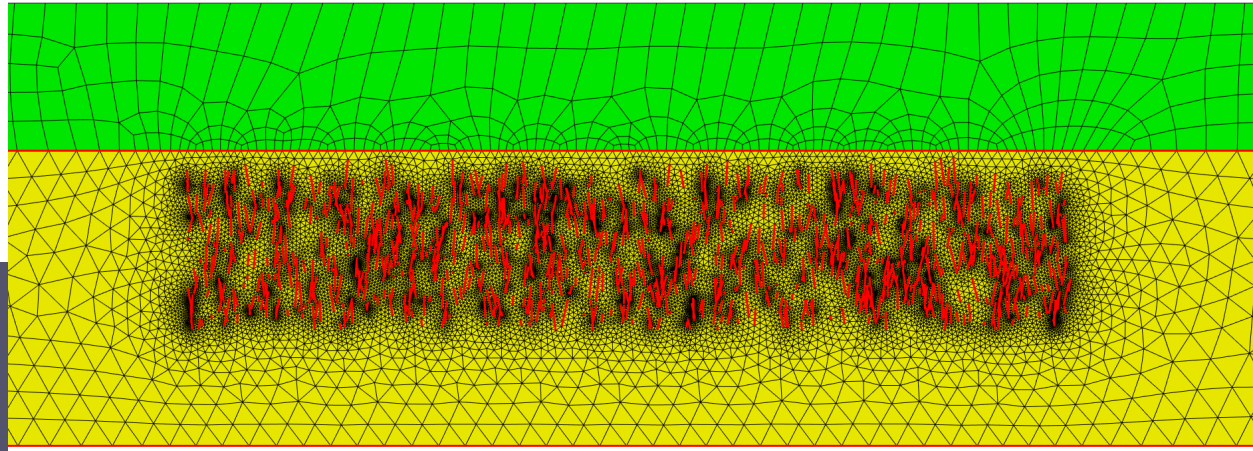
# Сейсмический мониторинг трещиноватости: постановка задачи





# Результаты численного моделирования

Двуслойный массив с системой трещин (длина 0.5-10 м, углы падения +/- 15°), являющихся источником вторичных волн.



Скорости (суммарные)

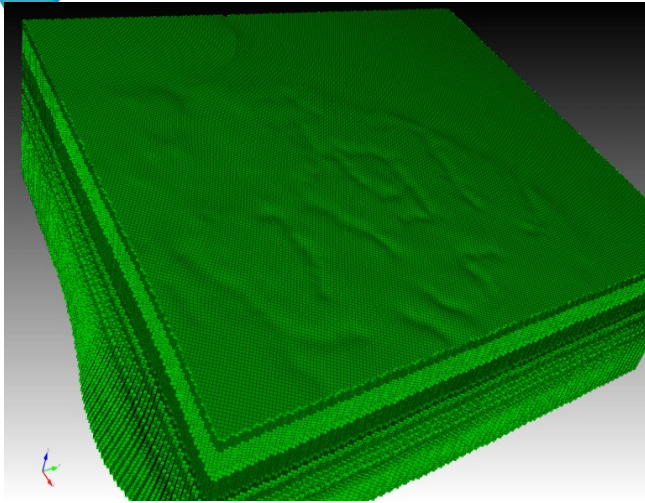
0

0





# ИНТЕГРАЦИЯ С Petrel



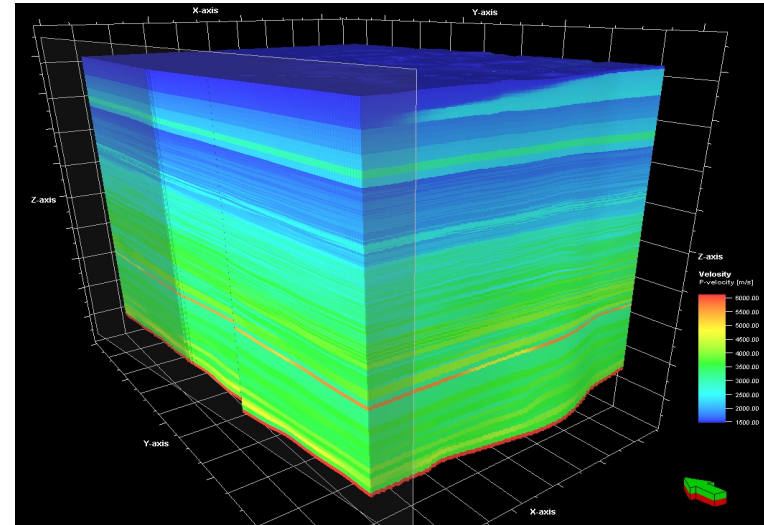
Гексаэдральная сетка, импортированная из Petrel



Shared earth—critical insight



- ✓ Полноволновое сейсмическое моделирование в трехмерной постановке;
- ✓ Прямая передача трехмерной геологической модели из Petrel в CAE Fidesys;
- ✓ Моделирование распространения волновых процессов для любых систем наблюдений, включая 3D
- ✓ Генерация синтетических сейсмограмм

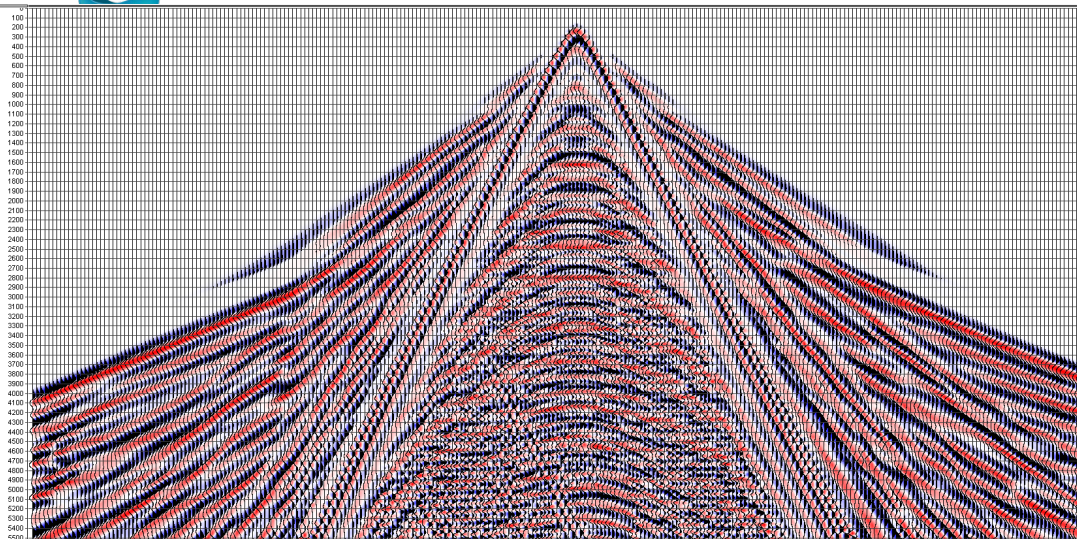


## Цифровая геологическая модель «Западная Сибирь»

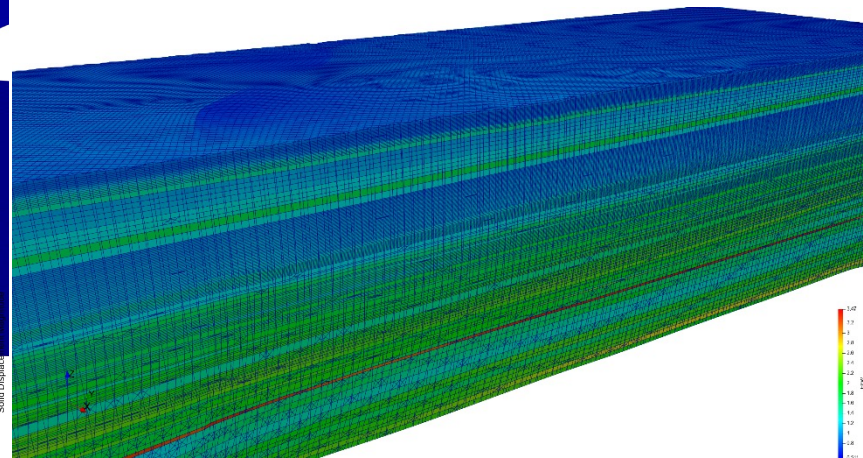
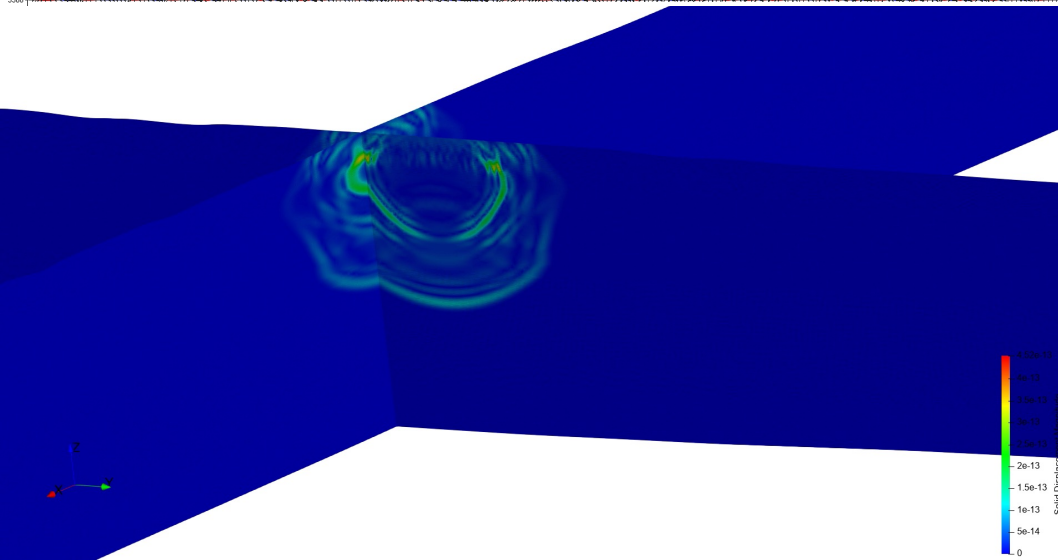
- ✓ 16×12 км по латерали и от 0 до -4.1 км м по вертикали
- ✓ 144 слоя по 39 961 значимых ячеек в каждом слое
- ✓ Смоделированы зоны вечной мерзлоты с очагами растепления
- ✓ Залежи УВ с соответствующим изменением свойств
- ✓ Разрывные нарушения, способные генерировать дифрагированные волны



# Результаты численного моделирования



- Полноволновое трехмерное моделирование методом спектральных элементов для детальной модели, содержащей более 5 миллионов элементов и **1.2 миллиарда** расчетных МСЭ-узлов (5й порядок).
- Время расчета – 5 часов (50000 шагов по времени, 0.3 секунды на шаг).
- Рассчитаны как поверхностные волны Рэлея, так и полный набор объемных отраженных, преломленных и рефрагированных волн, продольных, поперечных и обменных.
- Учитываются всевозможные факты дифракции и многократных отражений – всё то, что происходит в реальной среде.





# Спасибо за внимание!

**Вершинин Анатолий Викторович**

*Email:* [a.v.vershinin@cae-fidesys.com](mailto:a.v.vershinin@cae-fidesys.com)

*Тел.:* + 7 (495) 177-36-18

*WWW:* [www.cae-fidesys.com](http://www.cae-fidesys.com)

*SaaS:* <https://prove.design>

*YouTube:* <https://www.youtube.com/user/Fidesys>

*Примеры:* <https://fidesys-solvers.ru>

*VK:* <https://vk.com/fidesys>